

Antenne EST  
1 Rue Claude Chappe  
CS 25198  
57075 METZ CEDEX 3  
Tél : +33 (0)3 87 17 36 60  
Fax : +33 (0)3 87 17 36 89

# **Evaluation du potentiel de gonflement résiduel des évaporites au droit du lotissement Weingarten à Lochwiller (Bas-Rhin)**

**RAPPORT E2016/027DE – 16ALS21010**

Date : 15/06/2016



# Evaluation du potentiel de gonflement résiduel des évaporites au droit du lotissement Weingarten à Lochwiller (Bas-Rhin)

RAPPORT E2016/027DE – 16ALS21010

Diffusion :

DREAL ACAL

MONCLAR Michel  
LE CLEZIO-CORON Anne-Florie  
HANOCQ Pascale  
HADADOU Rafik  
KIMMEL Marion

GEODERIS

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	M. KIMMEL	R. HADADOU	
Visa			



## SOMMAIRE

1	Contexte .....	3
2	Préambule .....	3
3	Bref rappel des faits.....	3
4	Cas comparables connus .....	4
5	Objectifs de l'étude : investigations complémentaires et évaluation semi-quantitative du potentiel de gonflement résiduel .....	5
6	Connaissances géologiques préalables.....	6
6.1	Généralités sur les argiles.....	6
6.2	Généralités sur les évaporites.....	7
6.2.1	Genèse des évaporites .....	7
6.2.2	Transformations post-sédimentaires des évaporites, et en particulier de l'anhydrite .....	8
6.2.2.1	Evolution minéralogique de l'anhydrite .....	8
6.2.2.2	Conditions d'apparition d'un gonflement.....	9
6.2.2.3	Caractéristiques du gonflement.....	10
6.2.2.4	Dissolution du gypse .....	11
6.3	Géologie régionale.....	11
6.3.1	Le Keuper d'Alsace-Lorraine.....	11
6.3.1.1	Fonctionnement du bassin évaporitique .....	11
6.3.1.2	Description des faciès anhydritiques .....	11
6.3.1.3	Description des différents types d'argilites et de minéraux argileux.....	12
6.3.2	Description du Trias des environs de Saverne .....	13
7	Acquisition d'informations relatives au site de Lochwiller .....	18
7.1	Présentation des forages réalisés .....	18
7.1.1	Rappel des buts des forages et choix de leur localisation .....	18
7.1.2	Déroulement du chantier .....	19
7.1.3	Diamètres de forages et description des équipements .....	20
7.1.4	Développement des piézomètres .....	21
7.2	Données géologiques et minéralogiques .....	22
7.2.1	Diagraphies gamma-ray : calcul du pendage géologique des couches .....	22
7.2.1.1	Principe des diagraphies gamma-ray .....	22
7.2.1.2	Résultats des diagraphies réalisées sur les forages de Lochwiller .....	22
7.2.1.3	Corrélations entre diagraphies .....	23
7.2.1.4	Calcul du pendage géologique .....	23
7.2.2	Description pétrographique et structurale des carottes de forages .....	24
7.2.2.1	Observations générales .....	24
7.2.2.2	Forage SC4.....	26
7.2.2.3	Forage SC5.....	27
7.2.2.4	Forage SC6.....	28
7.2.2.5	Forage SC7.....	28
7.2.2.6	Hypothèse de la présence d'une zone altérée.....	29
7.2.3	Données minéralogiques.....	30
7.2.3.1	Techniques d'analyses.....	30
7.2.3.2	Les différents minéraux en présence.....	30
7.2.3.3	Répartition spatiale de l'anhydrite et du gypse .....	37
7.3	Données relatives aux eaux souterraines .....	42
7.3.1	Données hydrogéologiques.....	42
7.3.1.1	Piézométrie .....	42
7.3.1.2	Observations concernant la perméabilité des terrains .....	49

7.3.2	Données de température et de conductivité électrique des eaux.....	49
7.3.3	Données hydrogéochimiques.....	56
7.3.3.1	Conditions de prélèvements.....	56
7.3.3.2	Résultats des analyses chimiques.....	57
7.3.3.3	Interprétation des analyses d'eaux souterraines.....	59
7.3.3.4	Etat de saturation des eaux vis-à-vis du gypse et de l'anhydrite.....	63
7.3.4	Données de datation des eaux.....	64
7.3.4.1	Méthodes utilisées.....	64
7.3.4.2	Résultats des analyses.....	66
7.4	Analyses géotechniques.....	67
7.4.1	Limites d'Atterberg et valeurs de bleu de méthylène.....	67
7.4.1.1	Principes.....	67
7.4.1.2	Résultats obtenus sur les phases argileuses des terrains de Lochwiller...70	70
7.4.2	Essais de gonflement ou essais œdométriques.....	71
7.4.2.1	Définition, objectifs et protocole des essais.....	71
7.4.2.2	Résultats obtenus.....	72
7.4.2.3	Interprétation des essais de gonflement.....	77
7.4.3	Mouvements de terrain en jeu.....	80
8	Synthèse et interprétation des informations acquises.....	80
8.1	Synthèse des observations et des analyses géologiques, minéralogiques, hydrogéologiques et chimiques.....	80
8.2	Synthèse des informations géotechniques.....	95
8.3	Prévision de poursuite de la surrection des sols.....	97
9	Recommandations.....	99
10	Références bibliographiques.....	102
11	Liste des annexes.....	105

**Mots clés** : Lochwiller, gonflement, anhydrite, forages, piézomètres, gypse, désordres

## 1 CONTEXTE

Le lotissement Weingarten, sur la commune de Lochwiller (Bas-Rhin) est le siège, depuis plusieurs années, de désordres survenus sur les infrastructures et sur le bâti, liés à un phénomène de surrection des sols. Cette situation trouve son origine dans des réactions de gonflement d'anhydrite, qui se transforme en gypse en présence d'eau. Un forage géothermique fuyard est très probablement l'élément déclencheur de ces désordres, auquel s'ajouteraient ensuite des infiltrations d'eau météorique et d'eau des réseaux déstructurés par les mouvements de terrain. C'est qui ressort de l'avis donné par GEODERIS (Rapport E2014/003DE du 9 janvier 2014 [1]) à la demande de l'Etat.

En 2015, une étude sur le potentiel de gonflement résiduel des sols du lotissement a été demandée par la DREAL Alsace via le Pôle Après-mine Est. Les objectifs, et les moyens d'y parvenir, sont détaillés dans le paragraphe ci-dessous. Ainsi, cinq forages dont quatre forages carottés ont été réalisés en été 2015, et équipés en piézomètres. Ils permettent de déterminer les caractéristiques géologiques, minéralogiques, et géotechniques des terrains et d'obtenir des informations relatives à la chimie des eaux, ceci dans le but d'apporter une meilleure compréhension de la répartition des évaporites dans le sous-sol, des circulations d'eaux souterraines, et de la dynamique de gonflement.

L'objectif est d'apporter des éléments quant à l'évolution future des mouvements de terrain et à la proposition de moyens d'atténuation éventuels.

La version PROJET diffusée en février 2016, a été soumise pour avis au Dr-Ing Erich Pimentel, de l'Institut d'Ingénierie géotechnique de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zürich (Suisse). Suite à une réunion et une visite des désordres sur le terrain, le 3 mars 2016, il a émis son avis d'expert en Annexe 14. Son avis, ses remarques et recommandations sont reprises dans le présent rapport.

## 2 PREAMBULE

L'expertise d'E. Pimentel valide le rapport de GEODERIS de la façon suivante. Il présente en introduction de son document : « *Les résultats et les conclusions de l'étude effectuée par GEODERIS concernant l'interprétation de la géologie, incluant l'orientation des couches du Keuper à gypse aussi bien que l'identification de niveaux à différents stades de gonflement, peuvent être confirmés. La détermination de l'étendue de ces niveaux, qui provient de l'interprétation des forages de reconnaissance, est vraisemblable. Comme mentionné dans les rapports<sup>1</sup>, la cause des désordres est le forage géothermique foré sur la propriété Kandel, qui a perturbé les conditions hydrogéologiques dans la formation du Keuper à gypse dans son voisinage* ».

Les avis et les remarques plus précis émis par E. Pimentel sont inclus dans le texte dans les paragraphes concernés.

## 3 BREF RAPPEL DES FAITS

Un lotissement a été implanté sur la colline du Weingarten à partir de 2006. Un forage géothermique implanté sur la propriété Kandel a été réalisé du 18 au 20 février 2008 à une profondeur de 140 m. Il a rencontré une venue d'eau sous pression à 64 m de profondeur. L'eau était stabilisée à 11 m de profondeur le lendemain matin. Le 20 février ont été

---

<sup>1</sup> Rapport GEODERIS E2014/003DE [1] et rapport PROJET 2016.

descendus deux tubes en U et une cimentation a été engagée afin de reboucher le forage et de supprimer tout écoulement d'eau entre les différentes couches géologiques en présence. Le coulis s'est infiltré dans des fissures vers 19-20 m de profondeur et n'est pas remonté au jour.

Vers mi-mars, des venues d'eau se sont produites sur la propriété Schorr, au travers du mur de la grange qui est adossée au versant et au travers de l'escalier qui descend à la cave sous la partie d'habitation principale. La fosse de vidange située sous la grange s'est remplie également d'eau. Par ailleurs, le puits situé dans la cour a vu son niveau monter beaucoup plus haut que d'ordinaire.

Des cimentations du forage ont été tentées à plusieurs reprises entre avril et octobre 2008. Deux injections de résine expansive sont réalisées à 14 m et 9 m de profondeur. Les venues d'eau ont finalement cessé dans la propriété Schorr, toutefois, le niveau d'eau dans le puits est resté plus élevé que d'ordinaire et le puits, selon son propriétaire, réalimente mieux.

Parallèlement aux problèmes de venues d'eau, les propriétaires Schorr nous ont fait mention de décollement de pavés et d'apparition de fissures provoquant des soulèvements du sol de la grange déjà en 2008.

En 2011 des fissures sont apparues dans plusieurs maisons à Lochwiller, localisées en majorité au bas de la colline. Vers 2012, des désordres se sont produits sur la chaussée de l'impasse Koelberg, avec l'apparition de fissures et le soulèvement des regards. Des désordres aux canalisations ont été observés, de plus, au droit de regards situés dans la rue de l'Etang. Depuis 2013, on assiste à la poursuite de l'apparition et de l'aggravation des désordres. Une crevasse est apparue à proximité de la maison Borowiak-Cromer en août 2013, une seconde quelques temps plus tard.

En mars 2013 ont débuté les campagnes de nivellement sur la chaussée, les regards, les habitations. Le BRGM-DPSM a pris le relai en 2015.

Dans le cadre d'une expertise judiciaire, des investigations ont été réalisées : forages carottés et destructifs, pose d'inclinomètres, étude hydrogéologique et analyses d'eaux, entre autres.

## 4 CAS COMPARABLES CONNUS

E. Pimentel relate dans son expertise des cas de dommages provoqués par des forages géothermiques ayant entraînés des venues d'eau dans des couches à anhydrite du Keuper. Dans les deux cas, de nombreuses maisons ont été endommagées du fait d'une surrection des terrains, et jusqu'à présent le processus n'est pas stoppé, il a pu être ralenti.

- Cas de Staufen (Allemagne) : ce cas a été également cité par le BRGM en 2014 [2]. Des forages implantés en 2007 ont percé un aquifère sous-pression situé sous les couches à anhydrite, provoquant leur envahissement par de l'eau. Le taux de soulèvement maximal a été de 1,1 cm/mois. Les forages ont été rebouchés dans un second temps, et l'eau souterraine est actuellement pompée en continu, dans l'objectif de rabattre le niveau piézométrique au sein de la couche à anhydrite. À ce jour, ces mesures n'ont conduit qu'à ralentir le phénomène.
- Cas de Böblingen (Allemagne) : de l'eau a fui également via deux forages géothermiques vers des couches d'anhydrite sous-jacentes. Ces forages ont été rebouchés à plusieurs reprises entre octobre 2014 et janvier 2015. Des mesures effectuées par satellite montrent également un ralentissement de la surrection.

## **5 OBJECTIFS DE L'ETUDE : INVESTIGATIONS COMPLEMENTAIRES ET EVALUATION SEMI-QUANTITATIVE DU POTENTIEL DE GONFLEMENT RESIDUEL**

L'objectif de l'étude est d'établir une évaluation de l'extension spatiale des zones concernées actuellement par les transformations minéralogiques, de leur intensité et une première analyse de leur évolution éventuelle attendue.

Le programme réalisé est le suivant : les investigations ont concerné l'espace compris entre la surface et le niveau stratigraphique correspondant à la zone de perte dans le forage géothermique réalisé dans la propriété de M. Kandel et le fond supposé du puits Schorr (voir figure ci-dessous). Il a été estimé que poursuivre les investigations sous cette interface, correspondant à un drain potentiel, présenterait le risque de mettre localement en communication hydraulique des niveaux aujourd'hui isolés. Par ailleurs, les anhydrites paraissent mieux exprimées (sur la base de la géologie régionale) dans la partie supérieure du Keuper Inférieur.

Sur la verticale, les transformations minéralogiques ont été appréhendées via des analyses réalisées sur un carottage continu des terrains. Cela a permis de déterminer si les transformations (hydratation de l'anhydrite) sont homogènes sur la pile sédimentaire, si elles concernent les horizons profonds ou, au contraire, les horizons les plus superficiels. Des hypothèses quant à l'origine des eaux qui sont la cause du phénomène sont proposées. Les extensions latérales de ces transformations ont été approchées par une implantation spécifique des forages.

L'étude a nécessité la réalisation de quatre forages carottés de la surface à la limite stratigraphique correspondant à la zone de perte :

- l'un à proximité du forage géothermique sur la propriété Kandel afin d'avoir un état près du point d'origine des eaux « profondes ». Ce forage permet par ailleurs d'avoir une coupe de référence pour les horizons supérieurs traversés par le forage Kandel et a contribué ainsi à la préparation du rebouchage de ce dernier ;
- l'un complètement à l'est du lotissement, hors des zones soulevées, de manière à poser une référence géologique de la formation du Keuper ;
- l'un à proximité de la zone de soulèvement maximum ;
- le dernier enfin dans une situation intermédiaire, décalé vers le nord.

Les profondeurs des forages sont comprises entre 22 m et 47,5 m, en fonction de leur position.

Ces carottages donnent accès à la géologie détaillée et la répartition, ainsi que le mode d'expression de l'anhydrite et du gypse (en lamines, en nodules, ou autres) sur toute la colonne. Les couches d'argile sont également étudiées. Cela permet d'évaluer leur rôle dans le phénomène de gonflement de l'anhydrite en fonction de leur nature minéralogique, de l'épaisseur de leurs couches, du mode d'interstratification avec l'anhydrite, etc. Les diagraphies gamma-ray ont permis des corrélations entre ces forages mais aussi avec l'inclinomètre n°2.

Le programme est complété par des essais en laboratoire sur les carottes : essais de gonflement notamment, ainsi que sur les eaux. Des analyses chimiques ont été réalisées en vue de connaître le degré de saturation des eaux vis-à-vis des phases minéralogiques en présence, sur les différents forages. De plus, des analyses géochimiques isotopiques ont été effectuées également, sur ces mêmes eaux afin de fournir des éléments quant à leur origine.

Au-delà de l'aspect « quantitatif » immédiatement utilisable pour une évaluation grossière, ces données seront également intégrées, selon leur qualité, dans les phases ultérieures.

Au final, les données de sortie de cette phase sont :

- un modèle structural (représentant les interfaces des couches) sur l'épaisseur investiguée. Ce modèle, qui reste relativement simple, permet de positionner dans l'espace les différentes informations ci-après ;
- des profils « d'hydratation de l'anhydrite » à l'emplacement des forages, données qui peuvent être extrapolées sur l'ensemble de la zone en habillage du modèle ;
- une première évaluation du stock d'anhydrite restant et du potentiel de gonflement résiduel restant à survenir ;
- des recommandations pour des investigations complémentaires qui permettront de dimensionner des moyens d'atténuation.

## 6 CONNAISSANCES GEOLOGIQUES PREALABLES

Une brève synthèse bibliographique concernant les argiles, l'anhydrite, le gypse, et leur évolution en présence d'eau est proposée ci-dessous, afin d'aider à la compréhension de l'étude.

### 6.1 Généralités sur les argiles

Les argiles, ou minéraux argileux, sont des silicates d'aluminium plus ou moins hydratés présentant une structure feuilletée expliquant leur plasticité. Les minéraux argileux sont constitués à partir d'un empilement de feuillets tétraédriques et octaédriques entrecoupé par un espace appelé espace interfoliaire. On différencie les argiles par leur type de combinaison d'empilement des feuillets tétraédriques et octaédriques, par le cation de la couche octaédrique, par la charge de l'argile et par le type de matériel interfoliaire (matériel présent entre les feuillets).

Certaines argiles présentent la capacité d'augmenter leurs espaces interfoliaires. Cette propriété provient de l'incorporation de cations hydratés ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , etc.) dans ces espaces.

Les trois phases argileuses identifiées par les analyses minéralogiques des carottes prélevées à Lochwiller (cf. § 7.2.2) sont présentées succinctement ci-dessous. Il s'agit de l'illite, de la chlorite et des smectites.

#### L'illite

L'espace interfoliaire de l'illite est occupé par des ions potassium peu hydratés, responsables de la fermeture des feuillets argileux et de l'absence de propriété de gonflement de l'illite [3]. Selon [4], l'illite est sans doute le minéral le plus fréquent dans les sédiments triasiques lorrains.

#### La chlorite

Cette argile est hydratée, elle contient donc de l'eau dans son espace interfoliaire, ainsi que des cations de taille moyenne, le plus souvent du fer, du magnésium ou de l'aluminium [3]. Selon [6], la chlorite est très minoritaire dans les Marnes irisées inférieures.

### Les smectites

Les smectites sont apparues également dans les résultats des analyses des carottes de Lochwiller. Il s'agit d'un groupe de minéraux argileux qui présentent des liaisons particulièrement lâches entre les feuillets constitutifs, ce qui facilite l'acquisition ou le départ d'eau. Cette particularité permet à l'eau de pénétrer dans l'espace situé entre les feuillets, autorisant ainsi de fortes variations de volume (on parle de *gonflement interfoliaire* ou *intercrystallin*) [6]. Le gonflement est d'autant plus important que l'humidité est élevée. À un état parfaitement sec, une smectite n'aura aucune molécule d'eau [3]. Les smectites peuvent en outre contenir les cations suivants : fer, aluminium, magnésium ou silicium.

### Argiles interstratifiées

Il existe également des argiles interstratifiées, qui comprennent une alternance plus ou moins régulière de feuillets de nature différente, par exemple des interstratifiées illite-smectite, ou chlorite-smectite, qui sont également sensibles au gonflement en présence d'eau.

La sensibilité au gonflement des argiles est également liée à la surface spécifique particulièrement importante de certaines argiles (smectites). La quantité d'eau que peut renfermer une argile est directement fonction de celle-ci [7].

## **6.2 Généralités sur les évaporites**

### **6.2.1 Genèse des évaporites**

Il est actuellement clairement établi que le phénomène de surrection des sols à Lochwiller trouve son origine dans le gonflement d'argiles à anhydrite, minéral qui se transforme en gypse en présence d'eau. Ces deux minéraux sont des évaporites, ou roches salines. Il s'agit de sédiments chimiques composés de minéraux qui cristallisent à partir des substances dissoutes dans les eaux marines et concentrées par évaporation.

L'évaporation de l'eau de mer peut se produire dans des bassins, ou lagunes, partiellement ou totalement confinés. Elle conduit à la réduction du volume d'eau initial. L'évaporation doit être supérieure aux apports d'eaux extérieurs. Ceci amène la concentration des ions présents dans les eaux à un niveau supérieur à celui de leur produit de solubilité, conduisant à faire précipiter les minéraux. L'évaporation de l'eau de mer conduit à précipiter du NaCl (halite, ou sel de cuisine), des sels de potasse, et du sulfate de calcium ( $\text{CaSO}_4$ ). Au fur et à mesure que l'évaporation se poursuit, le sulfate de calcium est le premier à précipiter, soit sous la forme hydratée (gypse :  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), soit sous la forme anhydre (anhydrite :  $\text{CaSO}_4$ ), lorsque le volume de l'eau est réduit à environ 20-30% de son volume initial. L'orientation de la précipitation vers l'une ou l'autre forme dépend essentiellement de la salinité, et de la température des eaux [8]. Lorsque le volume d'eau est réduit à 10% du volume initial, la halite précipite (NaCl), suivie par d'autres sels, dont les sels de potasse.

Dans une solution pure de  $\text{CaSO}_4$ , l'anhydrite ne précipite que pour des températures supérieures à 60°C, mais en présence d'autres sels, sa température de précipitation peut descendre jusqu'à 25-30°C en fonction de la concentration saline. Selon [8], dans les conditions naturelles, le gypse est la forme la plus courante des évaporites marines, tandis que l'anhydrite se développe surtout dans la zone de battement des marées, ou au-dessus du niveau marin, là où les sédiments peuvent être suffisamment chauffés par le soleil et atteindre des températures plus élevées. Plusieurs hypothèses sont envisagées par les auteurs concernant la précipitation du gypse et de l'anhydrite.

- Première hypothèse, le gypse et l'anhydrite peuvent résulter d'une précipitation subaquatique qui se serait développée dans des bassins semi-isolés, conservant une connexion plus ou moins importante avec la mer plus profonde. En effet, dans ce type de bassin alimenté périodiquement en eau de mer, le renouvellement des saumures favorise les sels les moins solubles, et dans la séquence évaporitique (ordre de cristallisation des minéraux), les stades carbonates (calcaire, dolomie) et sulfates de calcium (gypse et/ou anhydrite), sont plus développés que les stades halite (NaCl) et sels de potasse, qui ne sont même souvent jamais atteints ;
- deuxième hypothèse, le gypse et l'anhydrite peuvent résulter d'une précipitation subaérienne, c'est-à-dire qui se produit à l'intérieur des sédiments émergés, à partir des eaux interstitielles. En général, c'est plutôt l'anhydrite qui précipite plutôt que le gypse, en faciès nodulaires, lenticulaires ou en bancs contournés (structure entérolithique) ;
- troisième hypothèse, la littérature mentionne le fait que l'anhydrite peut aussi résulter de phénomènes post-sédimentaires de déshydratation de gypse « précurseur » (cf. § 6.2.2), lorsque celui-ci est soumis à des fortes températures, par exemple lors de l'enfouissement.

## 6.2.2 Transformations post-sédimentaires des évaporites, et en particulier de l'anhydrite

La diagenèse<sup>2</sup> occupe une place très importante dans les séries évaporitiques. Il s'agit de transformations, qui commencent dès le dépôt du sédiment, et se poursuivent tout au long de l'histoire post-sédimentaire. Elles engendrent des circulations de fluides très concentrés responsables des transformations diagénétiques tardives qui affectent les séries salines traversées mais aussi les autres formations de la colonne sédimentaire [6].

### 6.2.2.1 Evolution minéralogique de l'anhydrite

L'hydratation de l'anhydrite en gypse secondaire peut intervenir dans des conditions de diagenèse précoce, ou tardive : par mise en contact d'anhydrite avec les eaux interstitielles météoriques au cours de la remontée des couches et de l'érosion [8]. Cette transformation de l'anhydrite s'accompagne d'une modification de volume, c'est-à-dire d'un gonflement. Selon [6], cette transformation en gypse secondaire respecte généralement les morphologies nodulaires initiales, ce qui ne permet pas de les distinguer facilement. Les microfaciès, par contre, sont toujours caractéristiques soit de l'anhydrite primaire, soit du gypse secondaire : mosaïques de cristaux automorphes, macrocristaux souvent riches en inclusions d'anhydrite, abondantes veinules ou filonnets de gypse fibreux. La présence de gypse fibreux associé aux faciès nodulaires est également un trait caractéristique du gypse secondaire de réhydratation d'anhydrite. Il a été interprété comme représentant le volume additionnel de gypse qui correspond à l'augmentation de volume attendue de la transformation [6].

Kinsman [9] précise que le passage de l'un à l'autre peut se faire en phases solides (déshydratation ou réhydratation à l'état solide) ou via une dissolution de l'anhydrite dans l'eau présente dans le milieu suivie par la cristallisation de gypse. L'apparition de gypse à partir d'anhydrite est à l'origine d'un gonflement de 61% (1 mole d'anhydrite 46,2 cm<sup>3</sup> → 1 mole de gypse 74,3 cm<sup>3</sup>) (Figure 1).

---

<sup>2</sup> Diagenèse : ensemble des processus physico-chimiques par lesquels les sédiments sont transformés en roches sédimentaires. Ces transformations ont généralement lieu à faible profondeur, donc dans des conditions de pression et température peu élevées. Elles engagent des processus variés, notamment : compaction, déshydratation, dissolution, cimentation, et autres.

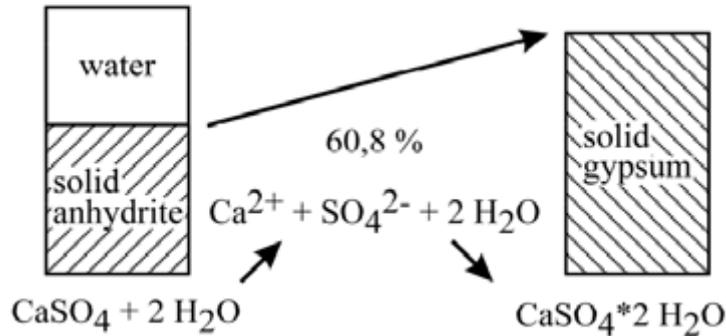


Figure 1 – Passage de l’anhydrite au gypse, en termes chimiques et volumiques [10]

Selon Anagnostou *et al.* [11], le passage de l’anhydrite en gypse se fait plutôt par dissolution-recristallisation (Figure 2). L’anhydrite se dissout dans l'eau interstitielle et, comme le produit de solubilité du gypse est inférieur à celui de l'anhydrite, le gypse précipite à partir de la solution tandis que les ions calcium et sulfate peuvent circuler par convection et, en raison de gradients de concentration ionique, également par diffusion. La dissolution de l’anhydrite et la précipitation du gypse se produisent conjointement avec le processus de transport. En plus de la cinétique de réaction, la vitesse de circulation de l'eau interstitielle est également importante. Il est théoriquement possible et il a été observé que la dissolution-lixiviation de la roche se produise dans un secteur, et que la cristallisation du gypse se produise dans un autre secteur, même s'il était vierge d'anhydrite initialement [9].

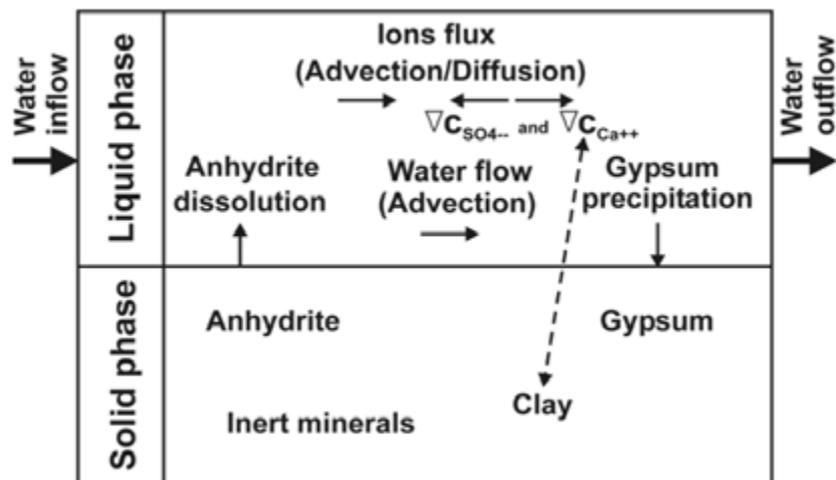


Figure 2 – Phases et constituants du milieu poreux et processus en présence [11]

### 6.2.2.2 Conditions d'apparition d'un gonflement

#### Les circulations d'eaux souterraines

On conçoit aisément que la perméabilité, la porosité, et les conditions hydrauliques jouent un rôle tout aussi important que la cinétique chimique de la réaction [12]. Pour que l'eau vienne en contact avec l'anhydrite, il faut supposer une certaine porosité de l'anhydrite. Par ailleurs, si l'eau circule avec un faible gradient hydraulique, il peut y avoir formation de gypse et le gypse peut colmater la porosité ce qui arrêtera la réaction. Toutefois, avec un gradient hydraulique plus important, c'est la dissolution qui l'emportera. En conséquence, les différentes configurations de circulation des eaux souterraines à grande échelle peuvent être la raison de la variabilité observée dans l'intensité du gonflement. Celle-ci varie donc en fonction des conditions d'écoulement et de leur évolution en cas d'intervention anthropique, type creusement d'un tunnel ou autre, en fonction de l'hydrologie de surface, des écoulements de subsurface, des structures géologiques ou de la morphologie du sol. La

perméabilité des terrains et la vitesse d'écoulement qui en découle sont importantes (d'après [11]).

En l'absence de perméabilité de fracture, la matrice argileuse gouverne le transport de l'eau et, en parallèle, les minéraux argileux sont susceptibles d'affecter l'équilibre thermodynamique du système anhydrite-gypse-eau en jouant un rôle sur la fixation ou l'apport d'ions calcium.

Il est à noter par ailleurs que l'hydratation de l'anhydrite a lieu sur sa surface. Par conséquent, une anhydrite massive et peu fissurée a tendance à gonfler moins qu'une anhydrite finement divisée [13], ou finement litée.

#### L'état de contrainte naturelle

L'état de contrainte naturelle joue un rôle important sur la survenue d'une surrection liée à un gonflement. Si le confinement est faible, le gonflement peut mécaniquement se produire. S'il est plus important (plus élevé que la pression de gonflement que l'on mesure en laboratoire au cours des essais de gonflement normalisés), alors le gonflement ne peut se produire [12]. Lorsque la couche d'anhydrite est à l'affleurement, les contraintes naturelles sont faibles, les microfissures peuvent s'ouvrir et la gypsification peut se produire. Le gypse secondaire apparaît et peut rester en place. En profondeur, le confinement plus important ne permet pas l'ouverture de microfissures et l'eau ne peut circuler. Même s'il en arrivait en petite quantité, le confinement s'opposerait à la pression de gonflement. L'anhydrite peut donc subsister.

#### En conséquence

Selon Robert et Fabre [14], pour que le gonflement puisse avoir lieu, trois conditions sont nécessaires :

- existence de minéraux susceptibles de gonflement par hydratation, principalement l'anhydrite et les argiles gonflantes (smectites) ;
- présence d'eau ;
- état de contrainte faible (contrainte principale majeure inférieure à la pression de gonflement), donc présence de l'anhydrite à faible profondeur.

### **6.2.2.3 Caractéristiques du gonflement**

Les pressions de gonflement de l'anhydrite sont généralement comprises entre 1,7 MPa et 4,7 MPa [15].

Pimentel [16] a mesuré des potentiels de gonflement pouvant excéder 8 MPa dans le Keuper à gypse du Freudensteintunnel, en Allemagne. Il a également mesuré des gonflements supérieurs à 30% avec des échantillons placés sous 3 MPa de contrainte. Ces gonflements ne sont pas attribués seulement à la transformation de l'anhydrite en gypse, l'anhydrite ne représentait dans ce cas que 20% du volume. Ils résultent d'un phénomène de fracturation de la structure sus-jacente des roches par la cristallisation du gypse, nommé « *cracking* », concept introduit par Pimentel [17] [18], d'après des observations basées sur un grand nombre d'échantillons. Le gonflement de l'anhydrite *in situ* peut ainsi s'accompagner de la formation de fissures qui vont permettre la circulation des eaux à travers la roche et augmenter la surface d'anhydrite en contact avec l'eau. En retour, la dissolution de l'anhydrite s'amplifie et la cristallisation du gypse par la sursaturation des sulfates dissous dans les pores vis-à-vis du gypse se produit. Les cristaux de gypse se forment principalement dans l'espace poral existant, et commencent à combler les pores. Quand ils sont comblés, la précipitation du gypse se produit d'abord dans les directions de contraintes

les plus faibles, tant que ces contraintes ne sont pas trop élevées [19], et provoque l'apparition d'une fissure dans la roche perpendiculaire à cette direction. En conséquence, de larges pores sont formés et l'augmentation de volume totale sera nettement plus élevée que l'augmentation de volume provoquée par la simple transformation moléculaire de l'anhydrite en gypse. Ainsi, il n'est pas possible de prédire les taux de gonflement des roches basées uniquement sur leur composition minéralogique. Par ailleurs, il n'est donc pas possible de définir une pression de gonflement maximale par des essais œdométriques.

La durée du processus de gonflement est très longue. La plupart des essais en laboratoire se sont terminés avant qu'un état stationnaire ne soit atteint. Le gonflement de l'anhydrite dans un tunnel ferroviaire suisse instrumenté n'est toujours pas stabilisé des années plus tard [11].

#### **6.2.2.4 Dissolution du gypse**

Le gypse est très soluble (2 g/l à 20°C), davantage soluble que l'anhydrite (3 g/l à 20°C) [20]. Une fois l'anhydrite transformée en gypse, il est possible, si de l'eau sous-saturée vis-à-vis de ce minéral circule en contact avec ce dernier, que le gypse se dissolve. Dans le Trias germanique (Keuper de l'est de la France), cela peut se produire dans des fissures ouvertes, ou entre les bancs sédimentaires déstructurés par le gonflement. Dans des formations gypseuses plus massives (dans le Bassin Parisien, ou les Alpes), du karst se développe fréquemment.

### **6.3 Géologie régionale**

#### **6.3.1 Le Keuper d'Alsace-Lorraine**

##### **6.3.1.1 Fonctionnement du bassin évaporitique**

Le Keuper de l'est de la France marque la transition entre un sous-bassin sédimentaire marginal dépendant de la mer germanique, et l'individualisation du Bassin de Paris, par le déplacement d'est en ouest de la sédimentation évaporitique et de la subsidence en général [4]. Les observations de Rashid [4] dans sa thèse consacrée aux marnes à anhydrite de Lorraine, situées sous les dépôts salifères de Lorraine (dans les Couches à pseudomorphoses), et juste au-dessus de ces derniers (dans les Marnes à Esthéries), l'ont conduit à mettre en évidence des séquences de dépôt correspondant à des alternances d'épisodes inondation-émersion, caractéristiques des bassins évaporitiques. Il fait état d'une extrême platitude des environnements de dépôt, qui a des conséquences importantes : les inondations par les eaux pluviales et les incursions marines peuvent s'y étaler très vite et très largement, et, si ces apports liquides sont limités, en une tranche d'eau de faible épaisseur. Sous climat aride, l'évaporation de l'eau est très rapide, ce qui provoque l'augmentation de la salinité dans les eaux libres comme dans les nappes phréatiques, d'où la précipitation des évaporites. L'émersion totale des dépôts peut être atteinte.

L'absence de sel gemme en Alsace serait issue d'une migration vers l'ouest (soit au droit de l'actuelle Lorraine) des solutions salées, une fois débarrassées de leur sulfate de calcium déposé en Alsace, vers des régions plus subsidentes de la lagune [21]. Il en résulterait les dépôts de sel gemme très conséquents en Lorraine, dans la région de Nancy.

##### **6.3.1.2 Description des faciès anhydritiques**

Rashid [4] décrit la présence d'anhydrite, dans les Marnes irisées inférieures, sous la forme de nodules, de lamines, ou de remplissage de fissures, anhydrite qui n'a nullement été transformée en gypse sur le secteur décrit, situé aux environs de Nancy, certainement du fait

de la profondeur actuelle de ces dépôts. Cette profondeur les laisserait hors de toutes circulations d'eau, ou alors la contrainte verticale des terrains sus-jacents s'opposerait au gonflement de l'anhydrite, la laissant intacte.

Pour lui, il s'agit d'anhydrite primaire, et non issue de la déshydratation de gypse précurseur. C'est ce qui ressort également des observations en lames minces des terrains de Lochwiller (cf. § 7.2.3).

Enfin, il interprète la présence de nodules d'anhydrite comme des cristallisations qui se sont produites dans la zone d'évaporation capillaire des terrains, au-dessus du niveau de la nappe phréatique, et au-dessus du niveau marin, donc en période d'émersion. L'évaporation intense a concentré les eaux interstitielles. Il s'agit alors d'une anhydrite « diagénétique ».

L'anhydrite de Lorraine se trouve en alternance, comme en Alsace, avec des marnes bariolées, vertes, rouges, grises, ou noires.

### **6.3.1.3 Description des différents types d'argilites et de minéraux argileux**

Rashid [4] sépare différents types de dépôts argileux à l'intérieur de cette formation sédimentaire des Marnes à anhydrite de Lorraine. Il sera vu plus loin, au § 7.2.2, que des observations similaires peuvent être faites sur les carottes de Lochwiller. Il note la présence de :

- Dépôts subaquatiques (déposés sous le niveau de la mer) :
  - des argilites noires ou gris sombre sont présentes à la base des séquences de dépôt. Elles se sont déposées dans un milieu immergé réducteur auquel elles doivent leur teinte, à faible profondeur. Les lamines anhydritiques de précipitation directe indiquent que les eaux du bassin étaient des saumures saturées par intermittence vis-à-vis du sulfate de calcium ;
  - des argilites gris-vert, plus ou moins bien stratifiées ou même massives, surmontent en général les argilites sombres et sont à la base des argilites bariolées. C'est un faciès intermédiaire, déposé dans des eaux moins réductrices et moins concentrées que les argilites sombres, et dans un environnement moins profond. Elles ne comportent plus de lamines d'anhydrite mais plutôt des nodules, ou de l'anhydrite en imprégnation.
- Dépôts émergés (déposés au-dessus du niveau de la mer) :
  - des argilites rouges ou bariolées sont ensuite observées. Elles doivent leur couleur à la présence d'un oxyde de fer, l'hématite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Pour conserver cette couleur rouge, qui provient des sédiments argileux détritiques qui les composent, les dépôts doivent être exposés à l'air obligatoirement, faute de quoi ils deviendraient gris ou noirs. Selon [4], cette émersion témoigne d'un climat très aride, qui est également essentiel à la formation de l'anhydrite.

Cette phase d'émersion s'accompagne de déformations des structures, fissurations, diagenèses diverses, dissolution, érosion, etc.

La description, plus loin dans le rapport, des terrains rencontrés à Lochwiller permettra de faire le lien avec ces éléments.

Rashid [4] a procédé à des analyses des minéraux argileux, et a déterminé la présence, dans les marnes du Keuper inférieur de Lorraine, d'illite, de chlorite, de smectites, et d'interstratifiés illite-smectite et chlorite-smectites (corrensite). Dans le Trias de Lorraine, il a déterminé que l'illite se trouve seule ou domine largement la chlorite, et ne dépasse pas 40% pour les faciès évaporitiques dans lesquels les minéraux argileux magnésiens (chlorite et interstratifiés à chlorite) sont majoritaires.

Dans la notice de la carte géologique, il est précisé que les argiles du Keuper, selon Lucas [22], comprennent une association d'illite, généralement assez ouverte, d'interstratifiés illite-chlorite (dont la corrensite) et de chlorite, souvent en faible quantité. Il peut s'y ajouter un peu de kaolinite. Les interstratifiés, en particulier la corrensite, sont généralement associés aux faciès évaporitiques. Il n'est pas fait mention, ni par Rashid, ni par Lucas, de smectites, alors que ces minéraux gonflants se sont avérés majoritaires dans les analyses (cf. § 7.2.3.2) de Lochwiller.

### 6.3.2 Description du Trias des environs de Saverne

La carte géologique de Saverne [5], éditée par le BRGM au 1/50 000, montre que la commune de Lochwiller est bâtie sur des formations géologiques sédimentaires du Trias supérieur, et plus précisément du Keuper inférieur. Sous le Keuper se rencontrent les couches de la Lettenkohle, puis du Muschelkalk (Figure 3).



Figure 3 – Extrait de la carte géologique au 1/50 000 (BRGM) -  
En rouge : localisation de la zone d'étude à Lochwiller

Les couches sont décrites ci-dessous, des plus anciennes aux plus récentes :

- le Muschelkalk moyen symbolisé « t4 » (45 m d'épaisseur) : marnes dolomitiques en plaquettes, puis argilites bariolées rouges et grises et marnes dolomitiques verdâtres. Les couches sont riches en évaporites, formées dans un milieu lagunaire sursalé ;
- le Muschelkalk supérieur symbolisé « t5 » (50 à 70 m d'épaisseur) : couches sédimentaires composées de calcaires coquilliers déposés sur une plateforme littorale en milieu franchement marin ;

- la Lettenkohle symbolisée « t6 » : couches sédimentaires composées de calcaires dolomitiques, argiles silteuses, et dolomies (épaisseur 22 à 28 m).

Pour les besoins de l'étude (cf. § 7.2.2.2), la géologie de la Lettenkohle, telle qu'elle est décrite dans la notice de la carte géologique de Saverne, est détaillée ici. Cette formation correspond à un épisode de régression marine<sup>3</sup>, intercalé entre la sédimentation carbonatée de plateforme marine du Muschelkalk supérieur et la sédimentation évaporitique du Keuper. À la sédimentation carbonatée, héritée du Muschelkalk supérieur, se surimposent des phénomènes de dolomitisation et s'associent des dépôts détritiques fins, d'origine continentale. Elle est subdivisée en trois termes :

- **t6a.** La Lettenkohle inférieure ou Dolomie inférieure (épaisseur : 6 à 8 m) : ensemble de bancs épais de calcaires dolomitiques et de dolomies, surmonté par un banc d'argile silteuse et feldspathique gris verdâtre, plus ou moins riche en plaquettes dolomitiques de 0,50 m environ, puis enfin ensemble de bancs massifs de dolomie grenue rouille localement gréseuse, épais d'1,50 m.
- **t6b.** La Lettenkohle moyenne :
  - sur les quelques affleurements observés par les géologues lors de l'établissement de la carte géologique, elle débute par un ensemble détritique de 5-6 m d'argiles silteuses feldspathiques légèrement calcaires, grises, à rares niveaux dolomitiques ou gréseux interstratifiés, plus claires ou ocre sur les 2 derniers mètres. Cet ensemble se termine par un niveau bariolé, lie-de-vin et vert clair (niveau repère éventuel), argilo-silteux, épais de 0,20 m environ ;
  - au-dessus s'observe une série composée d'une alternance de silts argileux noirs ou gris (rarement lie-de-vin), fins feuilletés, feldspathiques (proportion 4/5 pour la région de Saverne), et de dolomies grises à ocre à grain fin parfois gréseuses (proportion 1/5) ;

Dans la Lettenkohle moyenne, la fraction argileuse comprend de l'illite, des minéraux argileux interstratifiés et de la kaolinite, présente de façon épisodique.

- **t6c.** La Lettenkohle supérieure ou Dolomie-limite (épaisseur : 0,50 à 2 m). Elle présente un faciès lumachellique (composé de coquilles) assez caractéristique de teinte beige clair. Les coquilles sont souvent recristallisées assez finement. De la calcite est parfois associée à la dolomie. Sa partie supérieure peut présenter un faciès fin, homogène, pauvre en fossiles. La carte géologique précise qu'elle pourrait être localement discontinue. En effet, au sud et à l'ouest de Lochwiller, elle n'est pas cartographiée (Figure 4).

---

<sup>3</sup> Régression marine : baisse du niveau marin.

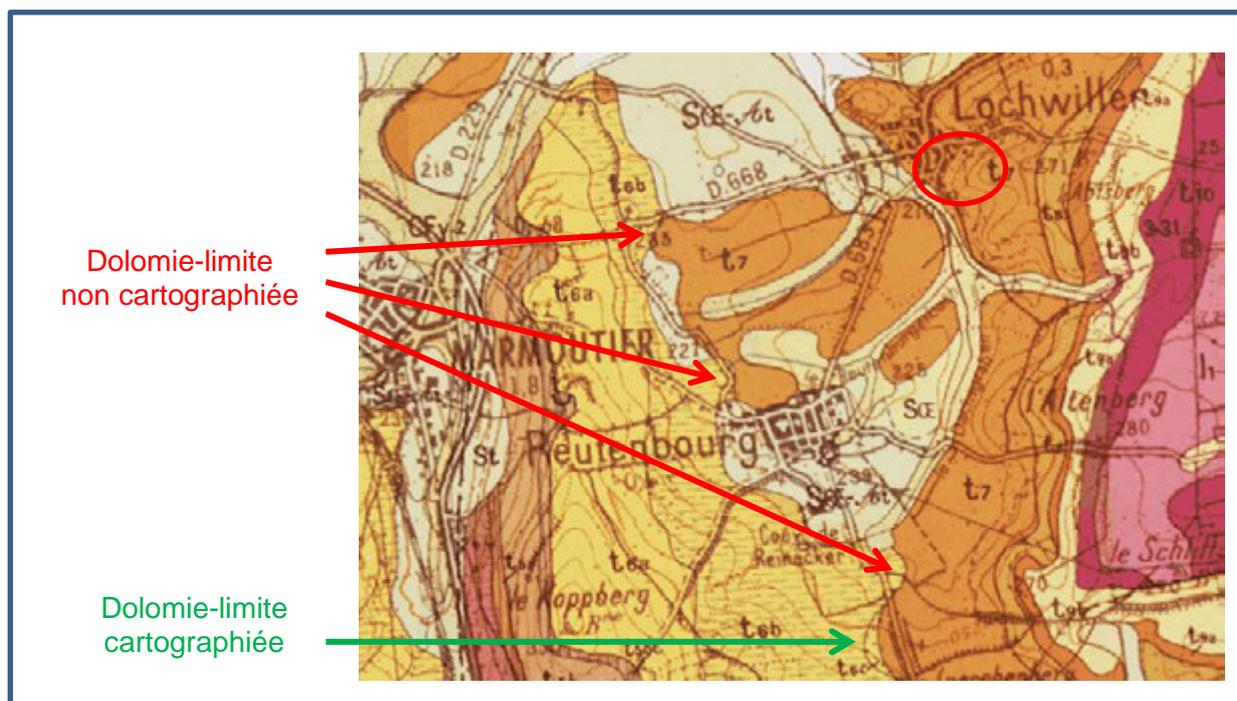


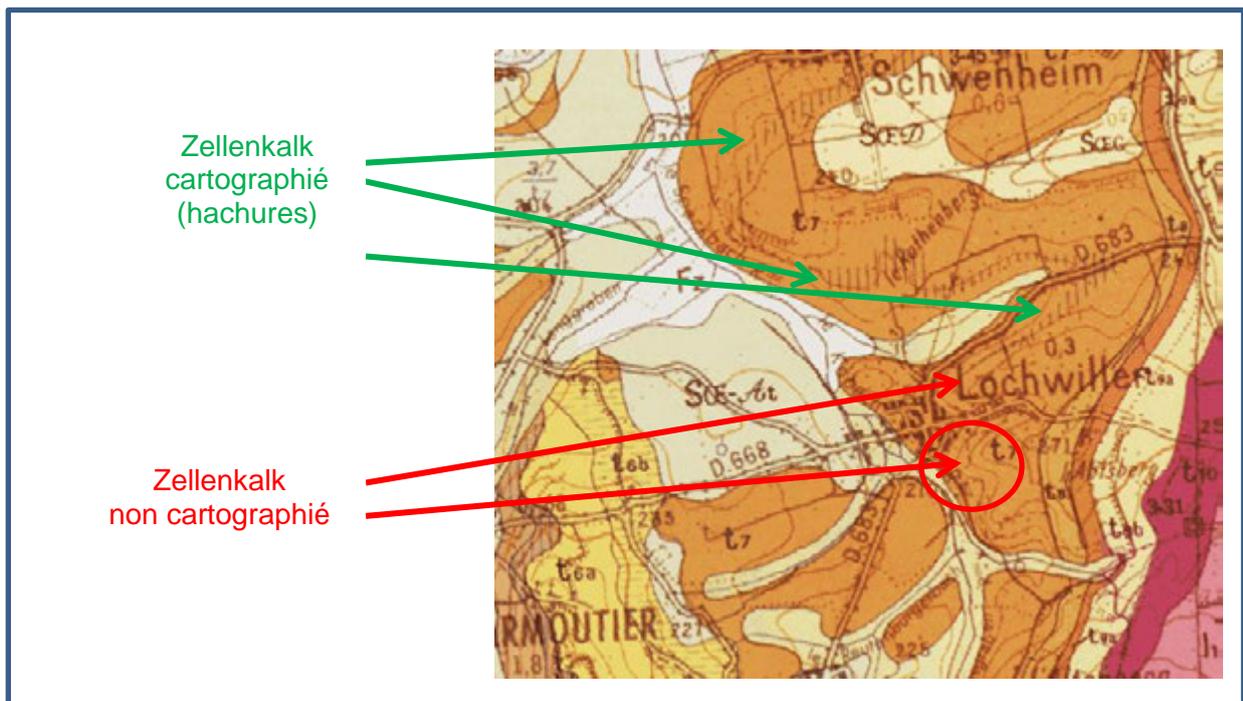
Figure 4 – Mise en évidence du caractère lacunaire de la Dolomie-Limite (t6c) dans le secteur de Lochwiller (Carte géologique BRGM 1/50 000)

- Le Keuper, qui affleure à Lochwiller, apparaît, dans l'est de la France (§ 6.3.1), comme une formation riche en évaporites (roches constituées par différents sels cristallisés) correspondant à une paléogéographie de lagunes sursalées et constituée en grande partie d'argiles silteuses bariolées de teintes vertes et lie-de-vin appelées Marnes irisées. Son épaisseur totale est de 130 à 140 m. Les argiles comprennent une association d'illite, d'interstratifiés illite-chlorite, et de chlorite, souvent en faible quantité.

Le sous-bassement du secteur de Lochwiller, qui date du Keuper inférieur, symbolisé « t7 », (épaisseur de 100 m environ), est constitué, du bas vers le haut, par les formations listées ci-dessous. Les épaisseurs sont données à titre indicatif, elles correspondent à des épaisseurs moyennes tirées des observations sur la région.

- Marnes à pseudomorphoses de sel (épaisseur environ 80 m) : argilites dolomitiques verdâtres finement litées. Ces marnes peuvent contenir des bancs ou des lentilles de gypse ou d'anhydrite. Au sein de cette formation peut s'intercaler un banc de calcaire cellulaire (épaisseur 2 à 4 m) appelé Zellenkalk. Il peut être localement absent (il n'est pas cartographié au droit du village de Lochwiller) (Figure 5). Au vu de sa position sur la carte géologique, il serait localisé, si présent, à environ 8 m du toit des Marnes à pseudomorphoses ;
- Marnes irisées inférieures (épaisseur 12 m) : argilites bariolées rouge et vert à nodules de quartz, pouvant contenir de l'anhydrite ou du gypse, à la base ou au sommet de la formation (la carte mentionne que c'est le cas près de Reutenbourg, à quelques kilomètres de Lochwiller) ;
- Marnes à Esthéries (épaisseur 6 m) : argilites dolomitiques verdâtres.

Il n'est pas possible, à la lecture de la carte géologique, de déterminer à quelle formation précisément appartiennent les couches qui affleurent au droit du lotissement de Lochwiller. Toutefois, les observations des carottes ont permis de proposer un calage de la série sédimentaire (cf. § 7.2.2.5).



**Figure 5 – Mise en évidence du caractère lacunaire du Zellenkalk (hachures verticales à l'intérieur du Keuper inf. t7) dans le secteur de Lochwiller (Carte géologique BRGM 1/50 000)**

En contrebas de la colline où est situé le lotissement touché par les désordres, affleurent des matériaux sédimentaires plus récents, de type limons, loess, alluvions à proximité des cours d'eau (alluvions sablo-limoneuses).

L'interprétation de la carte géologique de Saverne indique un pendage plutôt orienté vers l'est. La carte géologique a permis de constituer la coupe géologique du secteur (Figure 6).

La présence d'anhydrite au sein des Marnes irisées inférieures du Keuper de la région de Strasbourg est mentionnée dans la carte géologique de Saverne (BRGM) [4] (cf. § 6.3.2). De plus, l'article de Firtion [21] décrit la présence de gisements de gypse et de gypse/anhydrite dans la région sous-vosgienne à proximité de Strasbourg, entre Waltenheim-sur-Zorn et Flexbourg, communes situées dans les environs de Lochwiller (environ 10 km). Il décrit l'anhydrite en disposition stratifiée mise en évidence par des lits marneux, ou par une gypsification secondaire.

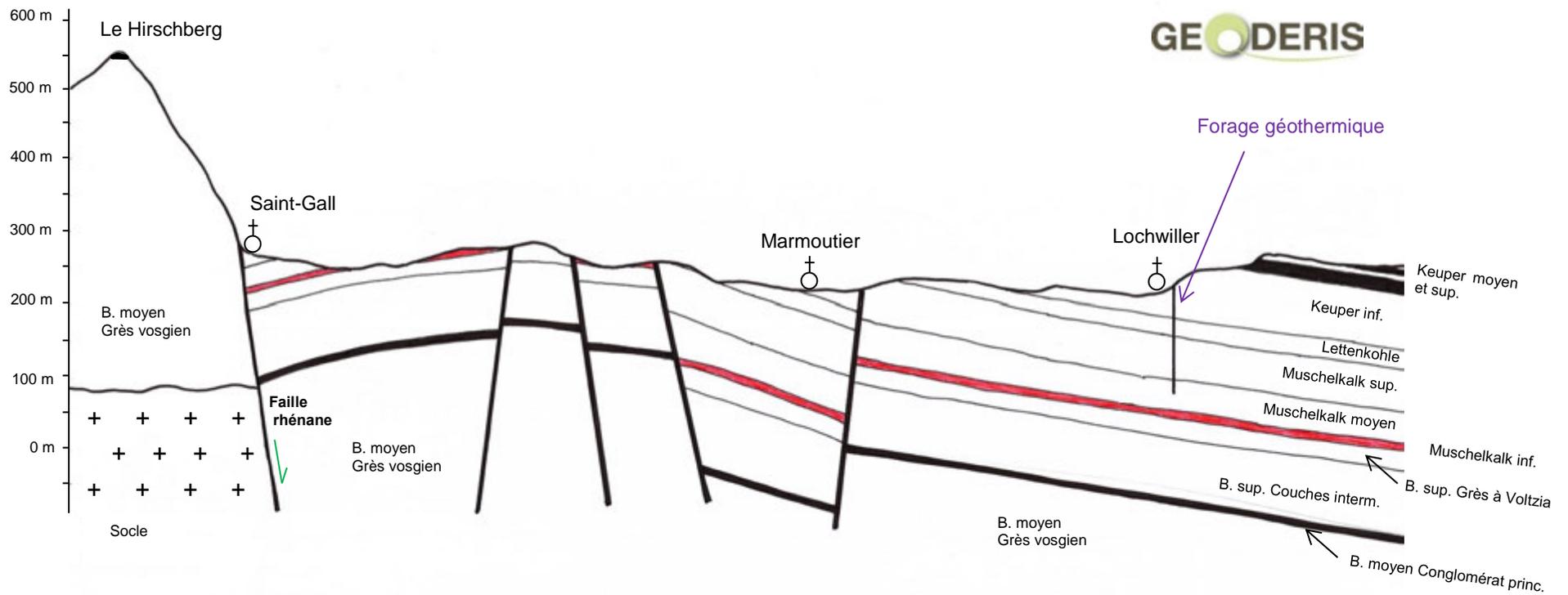


Figure 6 – Coupe géologique du secteur de Saint-Gall-Marmoutier-Lochwiller (d'après carte géologique BRGM 1/50 000 de Saverne) (B. : Buntsandstein)  
Exagération verticale x5

## **7 ACQUISITION D'INFORMATIONS RELATIVES AU SITE DE LOCHWILLER**

### **7.1 Présentation des forages réalisés**

#### **7.1.1 Rappel des buts des forages et choix de leur localisation**

Cinq forages, dont quatre carottés, ont été réalisés sur le lotissement Weingarten à Lochwiller. Ces forages ont pour but de :

- fournir des carottes de roches permettant une description précise des faciès sédimentaires en présence ;
- permettre la réalisation de diagraphies gamma-ray pour corréler les forages entre eux et calculer un pendage géologique ;
- fournir des informations sur la répartition, et le mode d'expression de l'anhydrite et du gypse (dispersé, massif) sur toute la colonne, et ainsi permettre de réaliser une évaluation de l'extension spatiale des zones concernées actuellement par les transformations minéralogiques et de leur intensité ;
- fournir des informations sur les argiles, qui seront également étudiées, afin d'évaluer leur rôle dans le phénomène de gonflement de l'anhydrite en fonction de leur nature minéralogique, de l'épaisseur de leurs couches, du mode d'interstratification avec l'anhydrite ;
- réaliser des investigations géotechniques sur les carottes ;
- permettre des prélèvements d'eaux souterraines à des fins d'analyses chimiques et d'analyses de datation ;
- permettre la réalisation de diagraphies conductivité-température des eaux souterraines.

Ils sont, comme proposés initialement (§ 5), répartis comme suit :

- SC4 : à proximité du forage Kandel afin d'avoir un état près du point d'origine des eaux « profondes ». Ce forage permet par ailleurs d'avoir une coupe de référence pour les horizons supérieurs traversés par le forage Kandel et a contribué ainsi à la préparation du rebouchage de ce dernier par le BRGM-DPSM ;
- SC7 : complètement à l'est du lotissement, hors des zones soulevées, de manière à poser une référence géologique de la formation du Keuper ;
- SC5 : à proximité de la zone de soulèvement maximum ;
- SC6 : dans une situation intermédiaire, décalé vers le nord.

Le choix des emplacements s'est effectué afin de pénétrer au minimum dans les parcelles de terrain privées. En dehors du SC4, situé sur la propriété Kandel, les autres sont situés en domaine communal.

La numérotation des forages carottés suit celle initiée par FONDASOL lors des premiers forages carottés SC1, SC2 et SC3 réalisés dans le cadre de l'expertise judiciaire.

## 7.1.2 Déroulement du chantier

La réalisation des forages a eu lieu entre le 7 juillet et le 12 août 2015. Leur emplacement exact est visible sur la figure suivante.

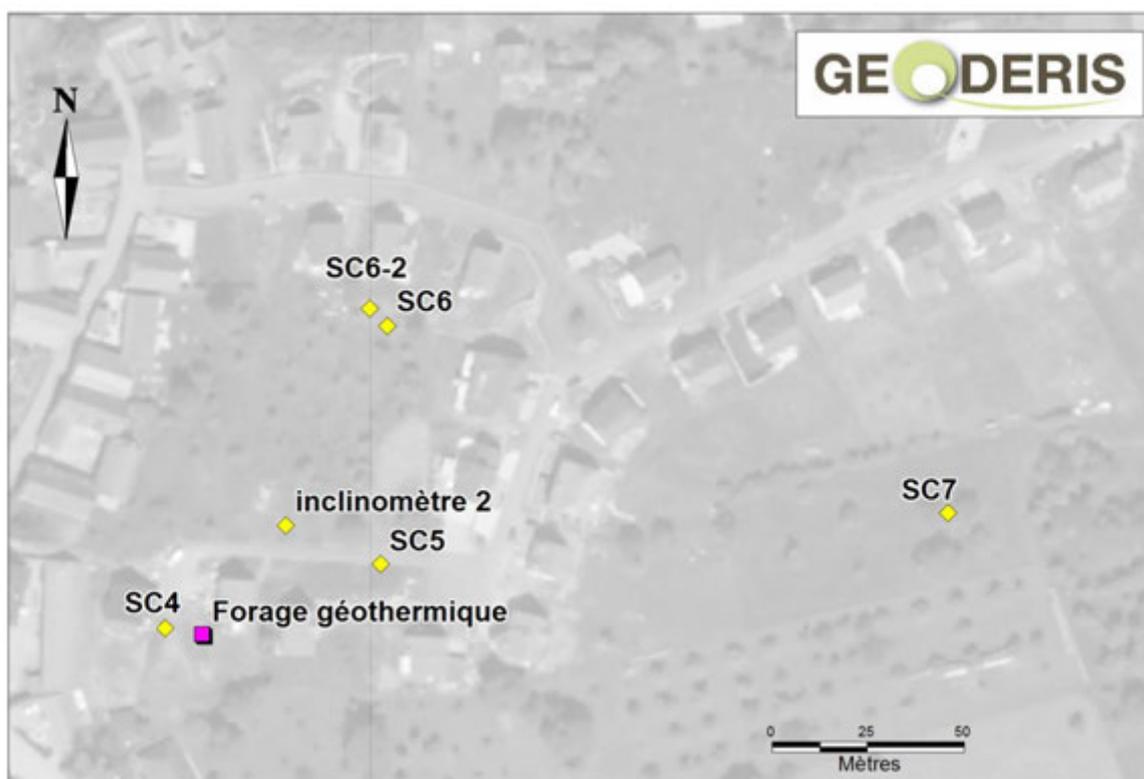


Figure 7 – Localisation des forages réalisés et de l'inclinomètre n°2

Un album photographique de l'ensemble des opérations effectuées est proposé en Annexe 1. De plus, l'Annexe 2 contient les Fiches de suivi de forage avec levé géologique détaillé réalisé par le technicien de GEODERIS en charge du suivi de chantier. Le Rapport de chantier de l'entreprise Ginger-CEBTP est présent en Annexe 11 (volume séparé).

Les forages présentent des profondeurs et des équipements indiqués dans le tableau suivant :

Nom	Profondeur atteinte	Profondeurs crépine	Profondeurs cimentations du fond
SC4	43,4 m	8-19 m	19-43,4 m
SC5	33 m	19,1-25 m	30,9-33 m
SC6	35,2 m	9-15 m	18-35,2
SC6-2	22 m	16-22 m	-
SC7	47,5 m	34-46 m	-

Figure 8 – Profondeurs des forages et de leur équipement

Les coordonnées des ouvrages réalisés sont les suivantes :

Nom	X	Y	Z (tête de l'équipement)	Z (terrain naturel)	Cote fond	Cotes crépine
SC4	1024946,811	6852938,904	220,980	220,310	176,91	201,3-212,3
SC5	1025002,730	6852955,688	230,050	230,050	197,05	205-211
SC6	1025004,388	6853017,895	226,374	225,804	190,60	210,8-216,8
SC6-2	1024999,866	6853022,350	225,330	224,790	202,79	202,8-208,8
SC7	1025149,935	6852969,129	243,851	243,511	196,01	197,5-209,5

Figure 9 – Coordonnées géographiques des forages (Lambert 93 - m NGF)

Des pertes totales de boue de forage sont été signalées dans deux ouvrages : SC4, à proximité du forage géothermique, à partir de 9 m (soit 211 m NGF environ), et SC7, dans le verger surmontant le lotissement, à partir de 39,10 m (soit 204,4 m NGF).

La diagraphie gamma-ray du forage SC4 a pu avoir lieu avant le rebouchage du fond du forage et la pose de l'équipement. Les diagraphies gamma-ray des quatre autres ouvrages forés et de l'inclinomètre du haut ont été réalisées en fin de chantier, le 27 août 2015.

Un forage complémentaire SC6-2 a été réalisé, afin d'obtenir un complément d'information quant à la présence d'eau dans le secteur situé en aval pendage du gonflement, permettant de disposer d'un « double » piézomètre. Le premier forage SC6 a été crépiné entre 9 m et 15 m de profondeur. Le fond a été soigneusement rebouché. Le technicien GEODERIS en charge du suivi des forages a observé que les terrains étaient humides jusqu'à 22 m de profondeur, au-delà ils semblaient plus secs. Un second forage crépiné sur une tranche inférieure (16-22 m) a été réalisé à quelques dizaines de mètres du premier. Cela a permis d'éviter de poser une crépine sur une profondeur trop importante, ce qui aurait pu avoir des conséquences dommageables, notamment la création d'un drain vers des terrains peut-être non impactés par des circulations d'eaux et par le phénomène de gonflement de l'anhydrite.

### 7.1.3 Diamètres de forages et description des équipements

Les coupes des équipements des piézomètres sont placées en Annexe 3.

Un avant-trou, pour chaque forage, sauf pour le SC6-2, a été foré, en Ø254 mm, après une première phase de carottage en Ø114 mm. À l'intérieur de l'avant-trou, un tube en acier de Ø168 mm a été scellé, afin d'isoler totalement les 7 premiers mètres des forages de toute infiltration d'eau. Les carottages ont ensuite été poursuivis en Ø122 mm, et réalisés en Ø154 mm.

Le fond des forages a été rebouché par un coulis de ciment expansif, afin d'éviter définitivement toute circulation d'eau sur les niveaux qui ne devaient pas être équipés en crépine, et qui sont peut-être exempts de circulations d'eaux. Au-dessus de ce niveau, un bouchon de sobranite de 2 m a été ajouté, afin de parfaitement sceller le bouchon. Il s'agit d'une argile qui se présente sous la forme de granulés, qui réagissent en présence d'eau en gonflant, et en générant ainsi une étanchéité parfaite.

Les forages ont ensuite été équipés en piézomètres, c'est-à-dire qu'ils contiennent chacun une crépine de Ø64-75 mm, destinée à capter les eaux souterraines sur la tranche de profondeur choisie. Autour de la crépine est placé un massif filtrant, composé de graviers siliceux, et destiné à filtrer les particules argileuses pour éviter qu'elles ne bouchent les ouvertures de la crépine.

Au-dessus et parfois au-dessous (dans l'objectif d'obtenir des diagraphies gamma-ray plus profondes) des niveaux crépinés, du tube plein, donc non perforé, a été placé. Autour de ce tube, et au-dessus du massif filtrant, un nouveau bouchon de sobranite a été placé sur

plusieurs mètres, additionné d'un remplissage par du coulis de ciment expansif jusqu'en surface.

Des capots métalliques ont été posés sur les forages SC4, SC6, SC6-2 et SC7. Une bouche à clef au ras du sol a constitué la fermeture du forage SC5, situé sur la chaussée.

#### 7.1.4 Développement des piézomètres

Les forages ont été développés par air-lift le 17 août 2015. La réalisation d'un air-lift consiste à injecter de l'air comprimé dans le fond du forage, afin de décoller les impuretés pouvant être liées à la crépine, et d'expulser les fluides présents (eau + additifs de forage) à l'extérieur, sous l'effet de la pression. Les opérations ont eu les résultats suivants :

	Niveau piézométrique /sol				
	SC4	SC5	SC6	SC6-2	SC7
Avant « Air Lift »	11,17 m	21,1 m	14,17 m	15,23 m	20,24 m
Intermédiaire	11,17 m	21,1 m	14,15 m	18,13 m	31,24 m
Fin « Air Lift »	11,19 m	21,1 m	14,15 m	18,33 m	32,25 m
<b>Remarques</b>	<b>Aucune sortie d'eau</b>	<b>Importantes sorties d'eau</b>	<b>Aucune sortie d'eau</b>	<b>Sorties d'eau modérées</b>	<b>Importantes sorties d'eau</b>

Figure 10 – Importance des sorties d'eau sur les forages suite aux opérations d'air-lift

L'absence de sorties d'eau peut indiquer que la réalimentation en eau des piézomètres est très mauvaise, du fait de l'imperméabilité des terrains. En conséquence, il a été réalisé des pompages, en vue de purger les piézomètres. Cela a été effectué le 25 août 2015 sur les forages SC4, SC6 et SC6-2.

	Niveau piézo /sol		
	SC4	SC6	SC6-2
<b>Avant pompage</b>	11,21	14	15,4
<b>Fin pompage</b>	18,9	17,85	21,9
<b>Fin + 30 minutes</b>	16,35	14,8	18,53
<b>Fin + 1h</b>	15,37	14,4	17,32
<b>Fin + 2h</b>	12,69	14,05	16,21
<b>Remarques</b>	<b>Débit de pompage 5l/min. 15 minutes pour assécher le forage</b>	<b>Débit de pompage 5l/min. 4,5 minutes pour assécher le forage</b>	<b>Débit de pompage 3,8l/min. 8 minutes pour assécher le forage</b>

Figure 11 – Débits de pompage de purge dans les forages et suivi piézométrique

Les informations obtenues quant à la géologie, la pétrographie, la minéralogie, la géotechnique et la nature chimique des eaux souterraines sont présentées dans les paragraphes suivants. L'Annexe 4 contient des fiches de synthèse par forage comprenant la diagraphie gamma-ray, les photographies des carottes, une description pétrographique synthétisée, en mettant en évidence les proportions d'évaporites et leurs différentes formes de cristallisation.

## **7.2 Données géologiques et minéralogiques**

### **7.2.1 Diagraphies gamma-ray : calcul du pendage géologique des couches**

#### **7.2.1.1 Principe des diagraphies gamma-ray**

Des diagraphies gamma-ray ont été réalisées sur les forages. Il s'agit de mesures de la radioactivité naturelle des terrains traversés par un forage, à l'aide d'une sonde qui est descendue, puis remontée, entre la surface et le fond du forage.

Cette radioactivité naturelle est provoquée le plus souvent par l'uranium, le thorium et le potassium 40. Les résultats de ces diagraphies permettent d'apporter des informations lithologiques. Les argiles se montrent le plus souvent fortement radioactives, pour plusieurs raisons : si elles sont potassiques (il a été vu au § 6.1 que l'illite est une argile potassique), si elles s'accompagnent de minéraux accessoires radioactifs, ou si elles ont absorbé, dans leur espace interfoliaire, des cations comportant uranium et thorium, ce qui est fréquent [23]. Les principales roches peuvent être classées selon leur degré de radioactivité. Pour ce qui concerne les lithologies rencontrées à Lochwiller, on peut mentionner les argiles (radioactivité élevée), et les évaporites sans potassium, halite, anhydrite (radioactivité faible). Les calcaires et dolomies sont également à radioactivité faible.

Les mesures peuvent se réaliser sur trous tubés ou non, et/ou remplis de n'importe quel fluide.

#### **7.2.1.2 Résultats des diagraphies réalisées sur les forages de Lochwiller**

Tout d'abord, il convient de préciser qu'une diagraphie dans le forage SC4 avant son équipement a été réalisée, puis une diagraphie dans chaque forage équipé, y compris l'inclinomètre 2 (en face de la maison Belhadj).

L'Annexe 5 présente l'ensemble des résultats de mesures sous la forme de graphiques, comprenant une première courbe (en vert clair) des mesures en remontée de la sonde (cela permet de caler le fond du forage en termes de profondeur), et la seconde (en vert foncé) également en remontée, cette fois-ci en moyenne glissante afin de lisser les courbes et de les rendre plus facilement interprétables. En vue d'interpréter les courbes obtenues, l'équipement des forages a été ajouté à côté des graphiques.

Comme il pouvait être attendu, si l'on compare les courbes obtenues aux terrains rencontrés (voir les descriptions des carottes de roches en Annexes 2, et 4), les diagraphies gamma-ray réalisées permettent de très bien distinguer les niveaux argileux (pics de signal), des niveaux évaporitiques (chutes de signal).

En commentaires préliminaires sur les variations lithologiques mises en évidence par les diagraphies, il est possible de remarquer que les 50 premiers centimètres sont peu émetteurs, probablement du fait de la présence de remblais, terrains remaniés, ou de limons de surface.

Sous cette première couche, le signal augmente, mais reste relativement constant sur les premiers mètres (environ 7-10 m pour les forages SC4, SC5, SC6 et 6-2, SC7, et plutôt 5 m sur l'inclinomètre n°2). Cela pourrait être dû à l'équipement des forages. En effet, ceux-ci comprennent, outre les crépines, et les graviers quartzeux, qui sont en principe neutres d'un point de vue radioactif, un remplissage de coulis de ciment, de sobranite, qui est une argile donc qui peut réagir aux mesures gamma-ray, ainsi qu'un tube d'avant-trou de 7 m de

profondeur. Cette longueur du tube n'est pas sans rappeler celle des résultats de gamma-ray relativement constants observés ci-dessus. Toutefois, la comparaison des courbes obtenues sur le forage SC4 nu et sur le forage équipé (accessible sur ses 19 premiers mètres) semble montrer que la radioactivité naturelle des terrains est bien constante sur les 7 premiers mètres. On notera, en outre, que les signaux enregistrés sur ce même forage avant et après équipement ne sont pas exactement identiques, mais ne présentent pas non plus de différences majeures. Il serait donc possible de considérer que l'équipement des forages n'a pas, ou très très peu, d'influence sur les mesures.

Ceci considéré, il est possible que la relative constance des signaux émis sur les premiers mètres de terrains mette en évidence la disparition des évaporites sur cette couche de subsurface, suite à des circulations d'eaux les ayant dissoutes. Nous reviendrons sur ce point plus loin concernant la description des carottes (§ 7.2.2) et les analyses minéralogiques (§ 7.2.3), qui confirment cette hypothèse.

En dessous de ces premiers mètres, les variations de signal sont nettement plus marquées, et permettent de bien séparer visuellement les passages plus argileux des passages plus évaporitiques, plus calcaires voire plus dolomitiques. Cela permet d'envisager des corrélations entre les forages.

### 7.2.1.3 Corrélations entre diagraphies

Les forages réalisés à Lochwiller étant peu distants les uns des autres, il est en principe possible de corréler les diagraphies. Dans notre cas, cette corrélation est rendue difficile car les forages ne recoupent pas complètement les mêmes niveaux sédimentaires, du fait du pendage géologique et du fait de la topographie, qui ajoute une épaisseur de terrains supplémentaires quand elle est plus élevée, et du fait de la disparition des bancs évaporitiques sur les premiers mètres sous la surface.

L'Annexe 5 propose des corrélations, marquées par des lignes colorées. Ces corrélations sont établies en fonction des événements argileux et évaporitiques observés sur les courbes, sur les descriptions géologiques des terrains (cf. § 7.2.2), mais se basent également sur les observations de pendage réalisées sur le terrain, notamment sur les affleurements visibles sur les propriétés Matjeka (Figure 12) et Schmitz.

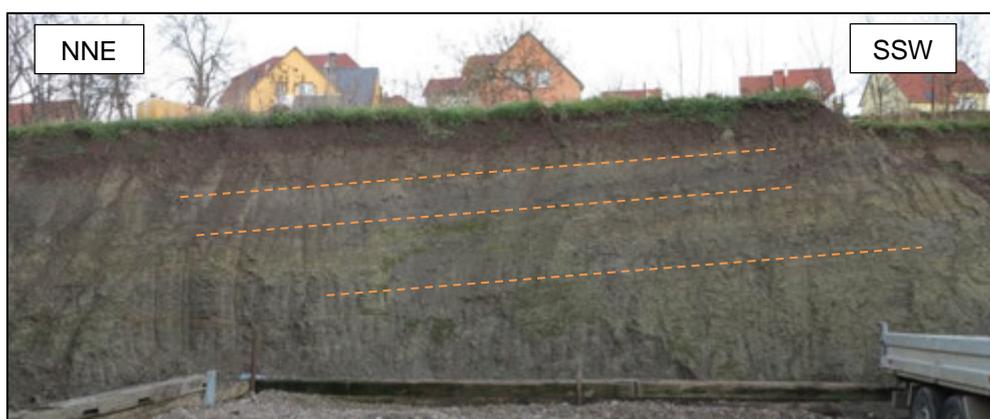


Figure 12 – Pendage apparent (nord-nord-est) sur l'affleurement de la propriété Matjeka

### 7.2.1.4 Calcul du pendage géologique

Un pendage nord-est compris entre 7° et 10° avait été proposé dans le document GEODERIS de 2014 [1], d'après les observations de terrain.

L'ensemble des observations effectuées sur les diagraphies a conduit aux corrélations proposées dans l'Annexe 5, puis aux calculs de pendage suivants :

- N111°E / 7,3°NE sur corrélation SC4, SC5 et SC6-2 ;
- N112°E / 7,3°NE sur corrélation SC4, SC6-2 et SC7.

Ces calculs sont cohérents avec le pendage évalué en 2014. Ce pendage est représenté sur la Figure 13. Toutefois, il n'est pas complètement en accord avec la carte géologique, dont l'interprétation fournirait plutôt un pendage vers l'est (cf. § 6.3.2).

Des corrélations géologiques sont proposées plus loin dans l'étude (§ 7.2.2.5). Ces corrélations sont basées sur un banc qui semble pouvoir servir de repère<sup>4</sup>. Il s'agit d'une sorte de brèche intra-formationnelle à remplissage gypseux rose ou orangé. Le calcul du pendage sur le mur de ce banc, observé sur les carottes de SC5, SC6 et SC7, indique un pendage orienté N112°E / 6,4°NE, ce qui est très proche des calculs précédents et semble valider la corrélation des diagraphies gamma-ray.

Les essais de corrélation sur la couleur des marnes et argilites n'ont pas fourni de résultat satisfaisant. Il semblerait que les couleurs varient au sein d'un même banc d'un forage à l'autre, en particulier quand les argilites et marnes sont bariolées.

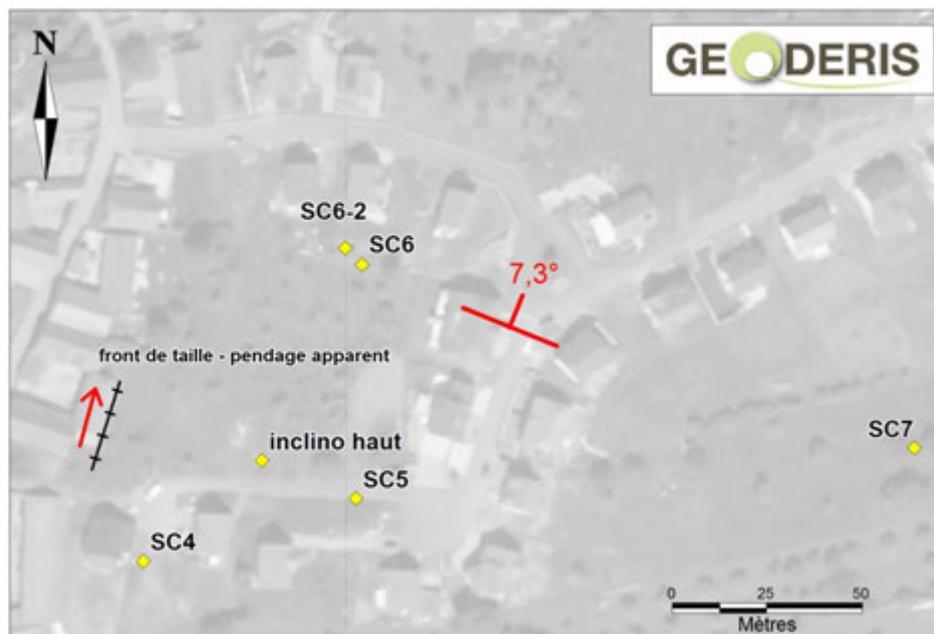


Figure 13 – Vue du pendage calculé d'après les corrélations des diagraphies gamma-ray réalisées sur les forages SC4, SC5, SC6-2 et SC7

## 7.2.2 Description pétrographique et structurale des carottes de forages

### 7.2.2.1 Observations générales

Les forages ont mis en évidence la présence de dépôts argilo-évaporitiques : argilites et marnes de teintes variées, bariolées, vertes, rouges, grises, ou noires, associées à des niveaux d'anhydrite et de gypse et à des intercalations plus dolomitiques.

Les faciès se présentent, sous la surface, et parfois plus en profondeur, sous la forme de

<sup>4</sup> Cotes du banc bréchiq ue : **SC5** : 206,5-207,2 m NGF, **SC6** : 200,0-200,8 m NGF, **SC7** : 198,6-199,25 m NGF.

couches décimétriques à pluri-métriques de marnes ou d'argilites (parfois plastiques) bariolées souvent sans litage apparent (Figure 14), comprenant quelques passées d'évaporites granulaires ou poudreuses ou quelques rares nodules évaporitiques.



**Figure 14 – Echantillon de terrains argileux plastiques (échantillon SC4-2 vers 3,5 m à droite, et SC7-12 vers 32 m à droite)**

Ces premiers faciès passent plus en profondeur à des faciès beaucoup plus finement lités, parfois feuilletés, ou parfois très compacts (Figure 15).



**Figure 15 – Exemple de terrains très compacts à tendance dolomitique à gauche (échantillon SC4-15 vers 21 m) et de terrains finement laminés qui se délitent plus facilement à droite (échantillon SC6-14 vers 32 m)**

Il s'agit d'alternances de lamines argilo-marneuses grises à noires, ou gris-vert, et de lamines évaporitiques, d'épaisseurs comprises entre quelques mm et environ un cm.

Ces faciès rencontrés plus profondément dans les forages présentent également des nodules évaporitiques. Ceux-ci sont de forme régulière, sphérique, ovoïdale, ou lenticulaires aux contours très démarqués de l'encaissant argilo-marneux, ou au contraire de forme quelconque, en taches et en nuages aux contours imprécis. Leur couleur varie du blanc au gris, au rose et à l'orangé.

On note également à certains niveaux la présence de micro-fractures verticales à subverticales (Figure 16), et même parfois relativement inclinées, d'ouverture millimétrique, à remplissage évaporitique. Certaines fractures d'ouverture plutôt centimétrique à pluricentimétrique contiennent des matériaux à l'aspect bréchique, mêlant débris de matrice avec cristallisations évaporitiques (exemple vers 32 m et vers 37 m dans SC4, très fréquent entre 39 m et 44 m dans SC7) blanches et parfois rosées.



Figure 16 – Exemple de fractures à ouverture pluricentimétrique et à remplissage évaporitique (à gauche SC4 vers 37 m, à droite SC7 vers 40 m)

Les descriptions précises des faciès rencontrés sont présentées dans les fiches de suivi de forages (Annexe 2). Une synthèse est proposée dans les feuilles descriptives des caractéristiques de forages, présentées en Annexe 4.

Les paragraphes suivants résument les lithologies rencontrées dans les quatre forages. Le lecteur peut se reporter aux photos des carottes présentées en Annexe 6, et aux fiches constituées sur les échantillons, reportées en Annexe 7.

### 7.2.2.2 Forage SC4

La profondeur du forage SC4 a été plus importante que celle prévue initialement d'une vingtaine de mètres, ceci dans deux objectifs : le premier était d'effectuer une reconnaissance de la présence, ou non, d'évaporites en-dessous du niveau limite initialement retenu pour l'étude (cf. § 5). Ce niveau avait été retenu car la morphologie du bombement laisse plutôt penser à un gonflement à une profondeur comprise entre 0 et 20 m. Le second objectif de cet approfondissement était de recalculer la série sédimentaire, en atteignant la base du Keuper inférieur, et donc le toit de la Lettenkohle. Celui-ci était attendu vers 33 m de profondeur (cf. [1]). La Dolomie-limite, qui marque la transition entre le Keuper et la Lettenkohle, est composée d'un banc dolomitique beige à faciès lumachellique (composé de coquilles) épais de 0,5 à 2 m. Elle était recherchée lors du forage, même si la carte géologique la montre parfois lacunaire dans le secteur de Lochwiller (cf. § 6.3.2). Sous ce banc-repère se rencontrent théoriquement des silts argileux noirs ou gris, fin et feuilletés, puis des argiles silteuses légèrement calcaires ou dolomitiques, voire gréseuses. Aucune évaporite sulfatée n'est signalée dans la notice de la carte géologique dans la Lettenkohle, pourtant il sera vu plus loin que des marnes noires à évaporites<sup>5</sup> ont été rencontrées jusqu'à 43,5 m, profondeur à laquelle le forage a été stoppé. Cet arrêt a été décidé afin de ne pas prendre de risques quant à la proximité de l'aquifère sous pression rencontré par le forage « Kandel » (venue d'eau sous pression à 64 m) et considéré comme l'évènement déclencheur du sinistre. Il est donc fortement probable que la base du Keuper n'ait pas été tout-à-fait atteinte. L'autre hypothèse est que localement, des niveaux évaporitiques sulfatés soient déjà présents dans la Lettenkohle moyenne.

Les terrains rencontrés dans ce premier forage sont les suivants. Ils débutent par 5 m d'argile et d'argile marneuse marron puis gris-vert, sans observation d'évaporites, ni de litage. Quelques petits nodules sont présents vers 1,5 m, d'apparence calcaire. Les analyses minéralogiques montrent la présence de gypse à hauteur de 18% dans l'échantillon prélevé à ce niveau (SC4-1).

L'argile marneuse gris-vert se poursuit jusqu'à 11 m (cf. échantillon SC4-2). Entre 5 m et 8,5 m, la présence d'évaporites est rare : des lits de petits nodules poudreux très fins ou granuleux sont notés entre 5,2 m et 5,4 m, ainsi que de minces lits d'évaporites de 2-3 cm d'épaisseur à 6,3 m, 7,3 m et 7,8 m (cf. échantillon SC4-3), incluant quelques nodules granuleux de 2 cm pour ce dernier niveau.

<sup>5</sup> Les analyses minéralogiques ont confirmé la présence de 35% d'anhydrite, 21% de bassanite et 7% de gypse primaire dans l'échantillon SC4-19 prélevé à 41,6 m (cf. Annexe 1).

À partir de 8,5 m, l'argile marneuse gris-vert se trouve en alternance avec des lits d'évaporites jusqu'à 10,8 m, avec des proportions pour ces dernières comprises en 10% et 50% volumiques. Leur apparence est blanche, parfois rose, avec des passages translucides ou fibreux. Les lits mesurent quelques mm d'épaisseur le plus souvent, 2-3 cm parfois (cf. échantillons SC4-7, SC4-5, SC4-6).

Cinq mètres de marnes bariolées gris-vert localement rougeâtres suivent, de 10,8 m jusqu'à 15,9 m, comprenant des intercalations d'évaporites (20-30%) blanches millimétriques, jusqu'à 2 cm d'épaisseur. Un litage fin est relevé. Vers 14 m, des nodules blanc-rose de 2-3 cm sont observés (cf. échantillon SC4-12).

À partir de 15,9 m, de la marne gris foncé a été observée jusqu'au fond du forage, à 43,4 m. Cette marne comprend des passages plutôt feuilletés, et des passages plus massifs (marne dolomitique), et se trouve en alternance avec des lamines blanches, grises, parfois roses, dans des proportions comprises entre 10% et 70%. Ces lamines s'avèreront, à l'analyse chimique, composées essentiellement de sulfates (anhydrite et/ou gypse) et de dolomite. Le lecteur peut se référer aux échantillons à partir de SC4-20.

Des fractures subverticales sont observées entre 24,4 m et 24,7 m, entre 30,0 m et 30,2 m, entre 32,10 m et 32,30 m, entre 34,30 m et 34,40 m, entre 37,0 m et 37,20 m, vers 38,60 m et vers 40,8 m. Le remplissage est d'apparence gypseux, blanc ou rose, parfois bicolore au sein d'une même fracture, ce qui témoignerait de phases de cristallisations successives, donc de phases d'ouvertures des fractures multiples.

### **7.2.2.3 Forage SC5**

Les terrains rencontrés dans le forage SC5 débutent par 5,5 m d'argile brun-rouge à bariolée, massive, sans litage. Deux fins niveaux comprenant des nodules granulaires d'évaporites de 3-4 cm ont été relevés à 2,6 m et 2,8 m, ainsi qu'un lit d'évaporites granulaires à 3,8 m (cf. échantillon SC5-1).

De 5,5 m à 14,8 m, de l'argile marneuse bariolée est présente (cf. échantillons SC5-3, SC5-5, SC5-4). Elle comprend des lits d'évaporites granulaires, assez minces, tous les 30-40 cm environ (cf. échantillon SC5-2), sauf entre 12,5 m et 14,5 m, où l'argile marneuse reste massive.

Entre 14,8 m et 18,6 m, on observe une argile marneuse plutôt gris-vert, à passées rougeâtres, massive, dans laquelle apparaissent de très rares lits poudreux ou granulaires d'évaporites (cf. échantillons SC5-6, SC5-7). Le pourcentage d'évaporites est estimé à quelques % uniquement, depuis la surface.

La transition est brutale à 18,6 m vers une roche plus massive composée de marnes gris-vert et d'évaporites en lamines millimétriques à pluri-centimétriques à hauteur de 10-20%, jusqu'à 22,6 m (cf. échantillons SC5-9, SC5-10). Entre 21 m et 22,6 m, la couleur est plutôt bariolée.

Entre 22,6 m et 23,5 m apparaît une zone qui semble fracturée, et remplie de gypse (83% de gypse, 1% d'anhydrite d'après les analyses minéralogiques) rose-orangé d'apparence saccharoïde (cf. échantillon SC5-11).

Sous ce banc, on note la présence de marnes gris foncé en alternance avec des évaporites, sous la forme de lamines millimétriques à pluri-millimétriques voir centimétriques, à passage massifs (SC5-12, SC5-13, SC5-14), ou plus feuilletés (SC5-18, SC5-15), jusqu'au fond du forage à 33,0 m. Le pourcentage d'évaporites serait de l'ordre de 10% à 30% selon les

bancs. Entre 25 m et 28 m, la teinte grise des marnes comprend des passages plus rouges. Des fractures à remplissage gypseux apparaissent entre 25-27 m.

#### **7.2.2.4 Forage SC6**

De la surface jusqu'à 12,75 m, de l'argile marneuse est observée. De teinte brun-rouge, elle comprend des passages bariolés (cf. échantillons SC6-3, SC6-4). Elle est massive, sans litage apparent, et présente quelques niveaux d'évaporites sous forme poudreuse (cf. échantillons SC6-1, SC6-2), voire granulaire. À partir de 9,4 m, des nodules sont notés.

Entre 12,75 m et 17,35 m, on observe la présence d'argile gris-vert localement silteuse, comprenant de rares lits d'évaporites poudreuses blanches.

À partir de 17,35 m et jusqu'à 25,8 m, les terrains sont composés de marne gris foncé plutôt feuilletée, à passages évaporitiques importants (10-30% volumiques) sous formes de lamines blanches ou roses, et de nodules (cf. échantillons SC6-6, SC6-5, SC-17, SC6-8, SC6-7, SC6-9, SC6-11, SC6-10). Des fractures subverticales sont notées à certains niveaux. Le remplissage est gypseux, blanc ou rose.

Un niveau fracturé rempli de minéraux rose-orangé massif est relevé entre 25 m et 25,8 m. Il ressemble à une sorte de passage bréchique où les cristallisations auraient comblé les cavités en cristallisant à l'intérieur. Les analyses minéralogiques montrent sur ce niveau dont l'échantillon porte le numéro SC6-10, 11% de bassanite et 74% d'anhydrite.

Entre 25,8 m et le fond du forage à 35,2 m, se trouvent des roches massives composées de marne gris foncé et de lamines blanches, qui constituent environ 20-40% du volume (cf. échantillons SC6-12, SC6-13, SC6-15, SC6-14 et SC6-16). De nombreux nodules sont présents, ainsi que du remplissage de fractures toujours subverticales.

#### **7.2.2.5 Forage SC7**

Les terrains recoupés par le forage SC7 débutent par 6 m d'argile marneuse et de marnes argileuses gris-vert contenant très peu d'évaporites : quelques lits discontinus poudreux, de petits nodules ou granules.

À partir de 6 m et jusqu'à 9,8 m, on note les mêmes marnes gris-vert, à passées rouges, comportant toujours quelques lits d'évaporites.

Dès 9,8 m, les marnes sont bariolées et se trouvent en alternance avec des lits d'évaporites millimétriques et des passages nodulaires, ceci jusqu'à 39,2 m. Dans ces niveaux, les marnes peuvent prendre des teintes très rouges (cf. échantillons SC7-2, SC7-11, SC7-12, SC7-3, SC7-13), ou sont parfois grises à gris-vert (cf. échantillons SC7-9, SC7-10). Les évaporites se trouvent en proportions estimées entre 10% et 30% globalement. On note des passages plus riches, notamment vers 26 m (50%) ou vers 26,5 m (80%).

Un niveau d'apparence calcaire, et comportant de petites cavités pluri-millimétriques a été relevé entre 12,8 m et 12,9 m (cf. échantillon SC7-1). Sa nature calcaire, ainsi qu'une composante siliceuse (silts ?) ont été détectées par l'analyse minéralogique. Il est fortement probable que ce niveau décimétrique corresponde au Zellenkalk mentionné dans la notice de la carte géologique comme un passage de calcaire celluleux peu épais (0,5-2 m), parfois lacunaire (cf. § 6.3.2). Le Zellenkalk a été échantillonné par nos soins à 1,5 km au nord-ouest de Lochwiller (cf. photographie 51 en Annexe 1).

À 39,2 m, une transition très brutale est observée, vers des marnes à passées grises et rouges comportant des lits nombreux d'évaporites, plus importants en volume qu'auparavant

(20-40%) (cf. échantillons SC7-4, SC7-5), et dont la caractéristique principale est l'état de fracturation. Une multitude de micro-fractures verticales à subverticales sont observées, et se démarquent fortement de l'encaissant par leur remplissage blanc certainement gypseux. Les fractures sont surtout présentes entre 39,2 m et 40,6 m (SC7-14), et entre 42 m et 45 m (SC7-6), puis enfin à partir de 46,3 m, jusqu'au fond du forage à 47,5 m. L'absence de fracturation au-dessus de 39,2 m semble montrer que cette fracturation est synsédimentaire, sinon les terrains sus-jacents seraient affectés également. Elle est certainement due à une période d'émersion des terrains au cours du Keuper.

Un important niveau d'apparence bréchique apparaît entre 44,25 m et 44,9 m. La cavité est remplie de cristallisations oranges, comportant un litage subhorizontal visible (cf. échantillon SC7-16), ce qui irait dans le sens d'une hypothèse de brèche intra-formationnelle synsédimentaire.

Les marnes grises à rouges décrites ci-dessus, à partir de 39,2 m, deviennent de couleur grise uniquement à partir de 46,75 m (cf. échantillon SC7-15), et jusqu'au fond du forage, à 47,5 m.

### 7.2.2.6 Hypothèse de la présence d'une zone altérée

On peut observer que, pour chaque forage, les premiers mètres sous la surface ne comportent que très peu d'évaporites (quelques %). Les couches concernées présentent les profondeurs suivantes :

- SC4 : 0-8,5 m (jusqu'à 211,8 m NGF) ;
- SC5 : 0-18,6 m (jusqu'à 211,45 m NGF) ;
- SC6 : 0-17,35 m (jusqu'à 208,45 m NGF) ;
- SC7 : 0-9,8 m (jusqu'à 234,0 m NGF).

Pour les forages SC4, SC5, et SC6, cela correspond aux profondeurs pour lesquelles la radioactivité naturelle mesurée par les diagraphies gamma-ray est d'amplitude relativement faible, cela a été souligné au § 7.2.1.2. On remarque en outre, d'après les corrélations proposées sur les diagraphies gamma-ray au § 7.2.1.3 (Annexe 5), que plusieurs mêmes niveaux peuvent être recoupés par plusieurs forages, en position plus ou moins proche de la surface, et qu'ils présentent, pour certains et selon les forages, des quantités variables d'anhydrite et de gypse. On peut prendre pour exemple, si l'on considère que les corrélations proposées sont justes, le niveau compris entre les repères bleu clair et vert (Annexe 5). Dans le forage SC4, ce niveau est situé entre 3 m et 6 m de profondeur, il ne comporte pas d'évaporites jusqu'à 5,2 m. Ensuite on observe deux lits minces d'évaporites poudreuses à 5,2 m et 5,4 m puis plus rien jusqu'à 6 m. Dans le forage SC5, ce même niveau est profond de 17,5 à 20,5 m environ, et comporte environ 20% d'évaporites, ce qui est le cas également dans les forages SC6 et SC7 où, à des profondeurs respectives de 18-21 m et 39,5-42,5 m, il comprend 20% et 20-40% d'évaporites respectivement. Il est donc fortement probable que les niveaux proches de la surface listés plus haut aient été altérés par suite des transformations et des dissolutions des sulfates, en lien avec des circulations d'eau de subsurface. Cette couche lessivée a été appelée « zone altérée », par opposition à la « zone intègre » qui contient encore la quantité d'évaporites initialement déposées lors de la formation des couches géologiques. Ce phénomène de zone altérée est mentionné dans la bibliographie, le Keuper est alors désigné comme « *leached Keuper* » ou « *weathered Keuper* » [24] [25].

## 7.2.3 Données minéralogiques

### 7.2.3.1 Techniques d'analyses

Les analyses minéralogiques ont été confiées au laboratoire GeoRessources de l'Ecole Nationale Supérieure de Géologie de Nancy. Les espèces minérales ont été identifiées tout d'abord sur lames minces, en lumière polarisée, puis en lumière polarisée et analysée. 300 points de comptage, sur chaque lame mince de dimensions 30 x 45 mm ont été réalisés, en vue d'estimer la part volumique de chaque minéral en présence. Les phases argileuses ont été séparées physiquement des autres phases minérales, puis analysées par DRX (diffraction des rayons X), afin de les distinguer.

Les résultats bruts sont consultables dans le rapport de GeoRessources en Annexe 12. Elles sont mises en forme et accompagnées de photographies en Annexe 7 dans les fiches relatives à chaque échantillon.

### 7.2.3.2 Les différents minéraux en présence

Les analyses minéralogiques ont montré que les roches extraites des forages réalisés à Lochwiller étaient formées en proportions variables de minéraux évaporitiques (sulfates de calcium uniquement, on note l'absence de chlorures), de carbonates (dolomite, magnésite, calcite), et de particules détritiques silico-alumineuses et siliceuses (minéraux argileux et quartz). Leurs composants résultent de phénomènes variés : décantation pour les particules détritiques, précipitation chimique (cristallisation de l'anhydrite ou de gypse primaire), ou recristallisation (gypse secondaire).

- **Les argiles**

Les minéraux argileux ont été identifiés par diffraction des rayons X après séparation des autres phases minéralogiques. Il s'agit de l'illite, des smectites et de la chlorite, minéraux présentés au chapitre 6.1.

La répartition des différents minéraux argileux, et de ces minéraux par rapport aux autres phases minérales, est présentée dans les graphiques des figures suivantes (Figure 17 et Figure 18). Le trait pointillé rouge indique la limite de la zone altérée, où les évaporites semblent avoir disparu (phénomène évoqué au § 7.2.1.2, au § 7.2.2.6 et plus loin au § 7.2.3.3).

Si l'on s'intéresse tout d'abord à la proportion d'argiles au sein des terrains pris dans leur globalité, elle est plus importante dans la zone altérée, que dans le reste des terrains (cas des forages SC4, SC5 et SC6. Aucune analyse minéralogique n'est disponible dans la zone altérée de SC7). Elle représente environ 35 à 55% de la roche dans la zone altérée, et plutôt 10 à 20% dans la zone intègre. Il est possible d'ajouter d'ores et déjà que la part d'évaporites est faible dans la zone altérée, à hauteur de quelques %, et beaucoup plus importante dans la zone intègre, entre 30% et 85% généralement. De même, la part des carbonates est relativement faible en zone intègre (10-20% généralement), et plus importante en zone altérée (40-60% généralement), certainement du fait de la disparition des évaporites.

Ensuite, il apparaît, concernant la part de chaque argile au sein de la phase argileuse, que les smectites sont majoritaires. Ce sont des argiles gonflantes, cela a été décrit au § 6.1. Elles représentent environ 50% de la phase argileuse. En seconde position vient l'illite, sur un quart à un tiers du volume de la phase argileuse. Il s'avère donc qu'elle n'est pas majoritaire, contrairement à ce qui est observé dans le Trias de Lorraine (cf. [4], § 6.1). De la chlorite apparaît enfin, sur 10 ou 20% du total de cette phase. La répartition de chaque argile

au sein de la phase argileuse ne semble pas évoluer entre la zone intègre et la zone altérée, la transformation des couches de subsurface ne semble avoir concerné que l'anhydrite et le gypse.

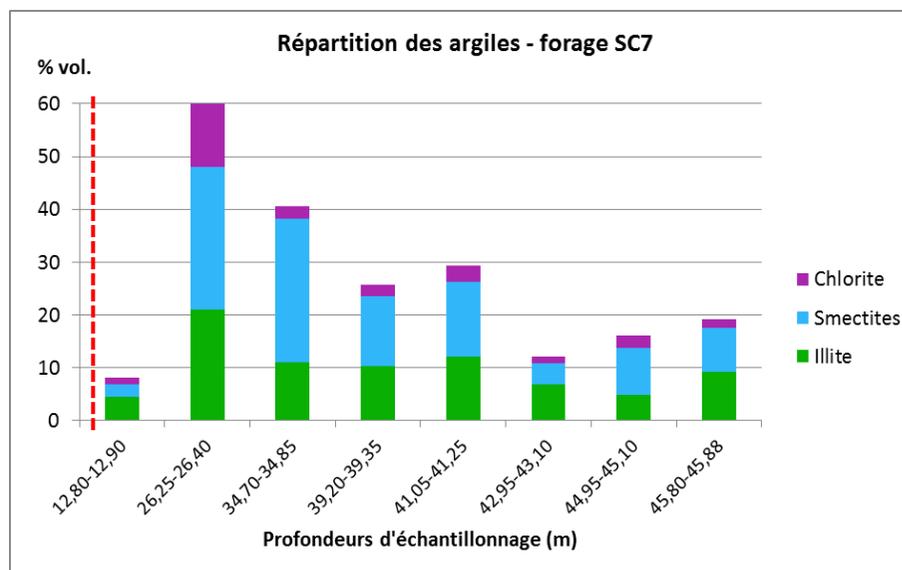
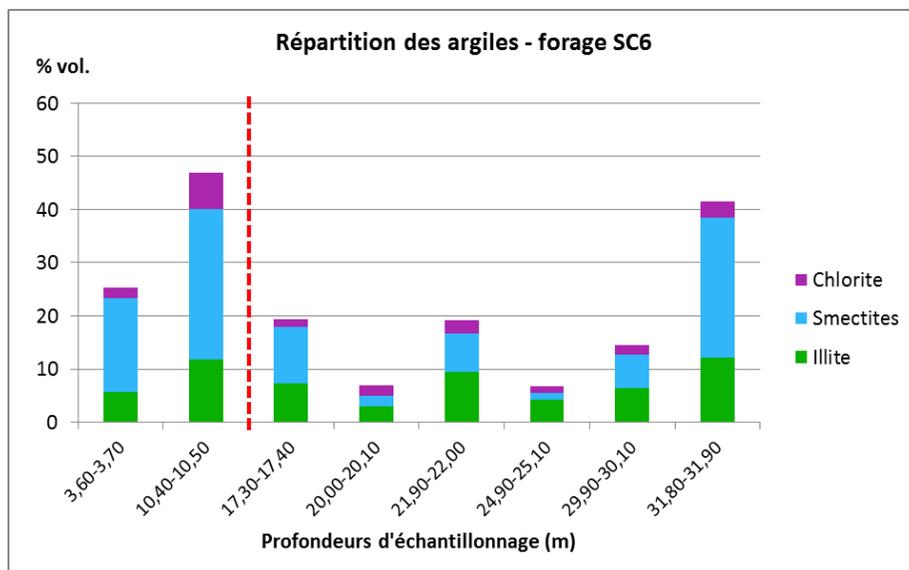
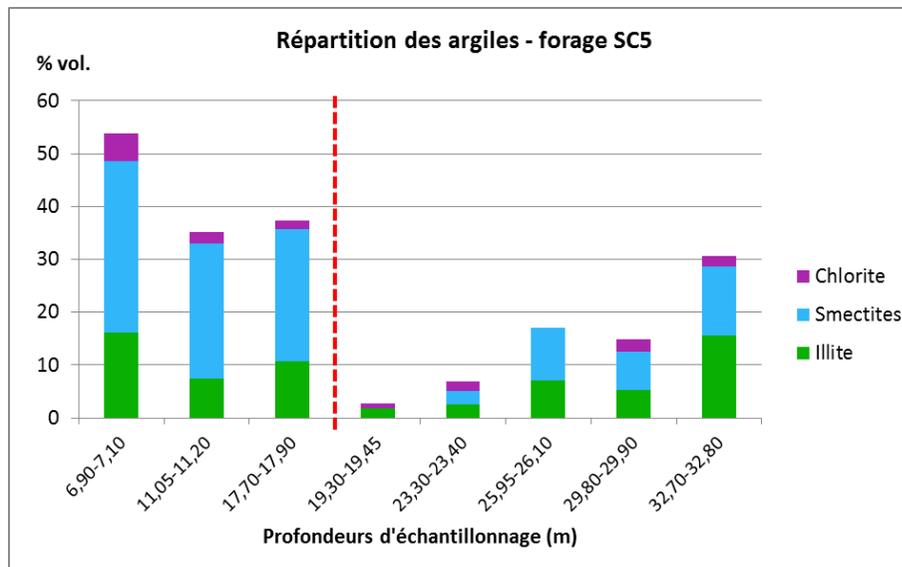
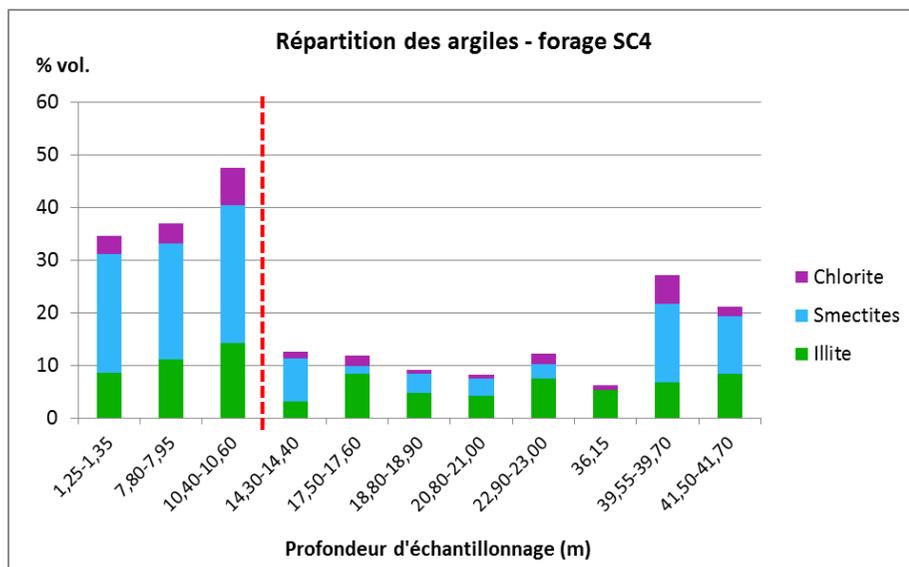


Figure 17 – Histogrammes de répartition des phases argileuses sur les échantillons analysés (trait pointillé rouge : limite basse de la zone altérée)

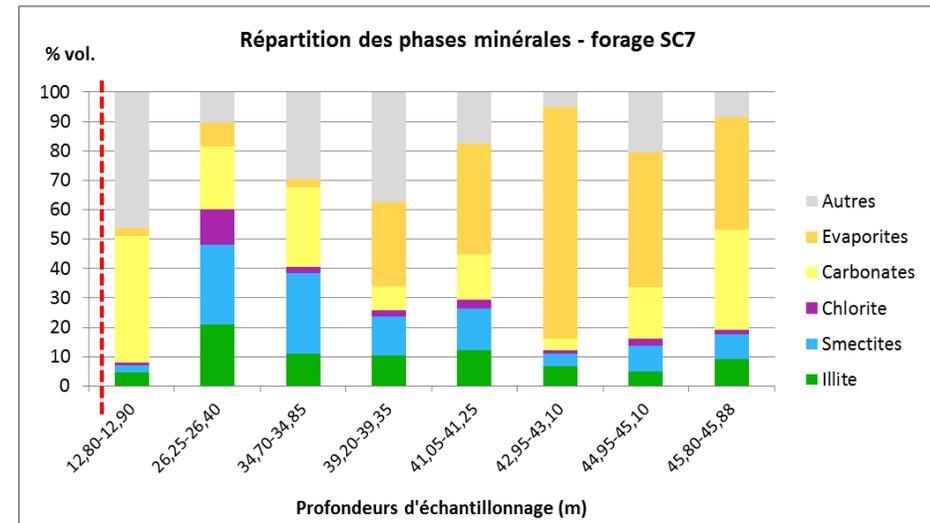
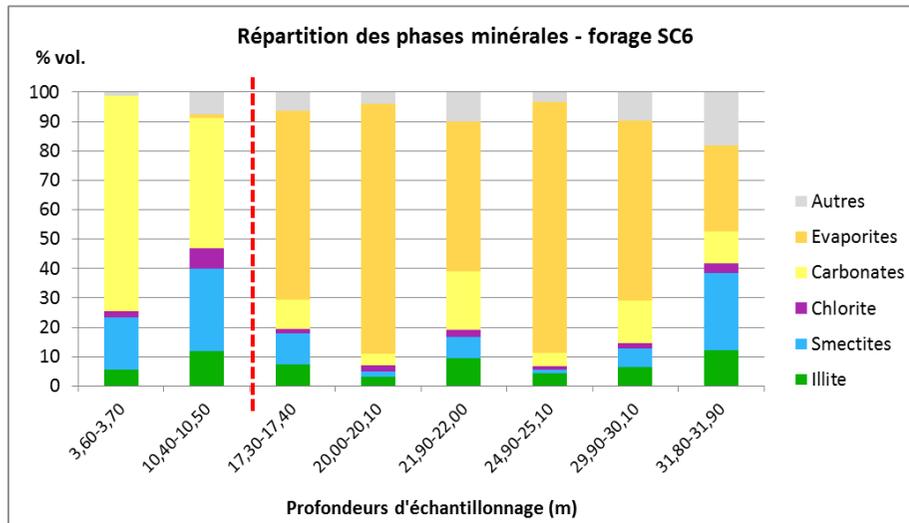
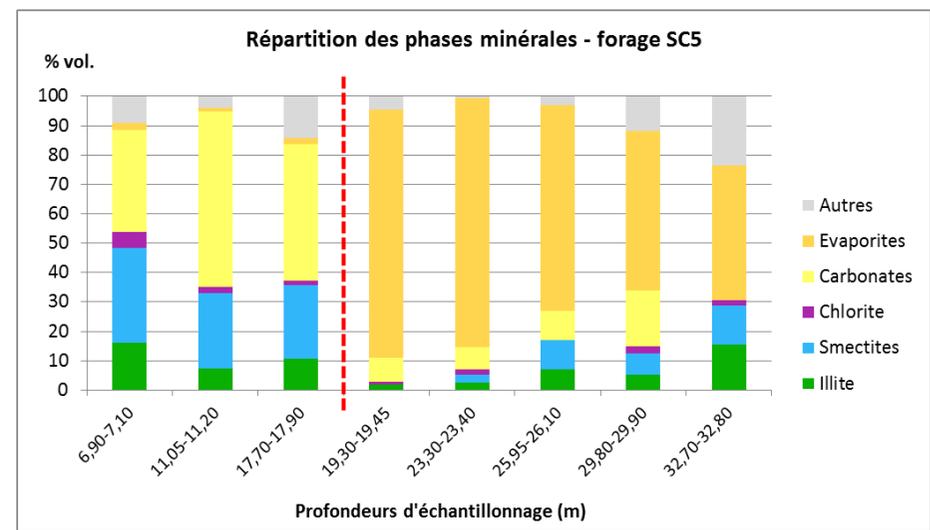
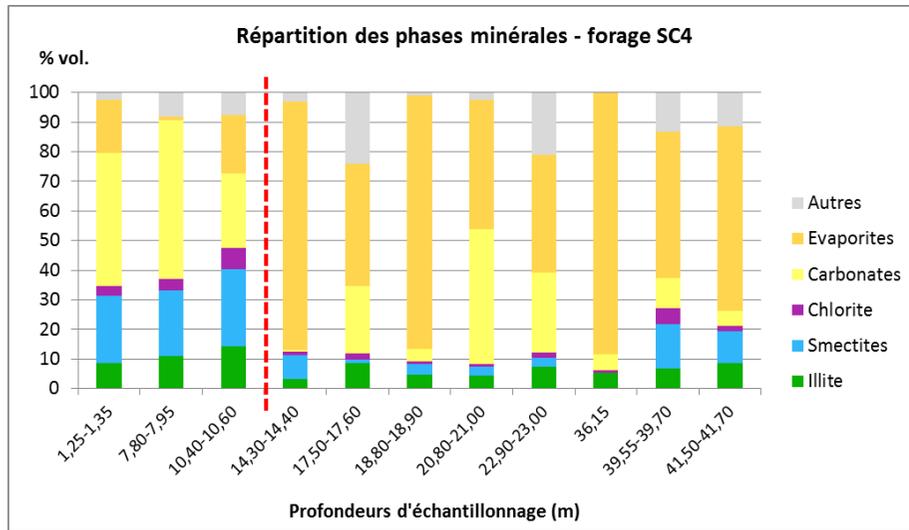
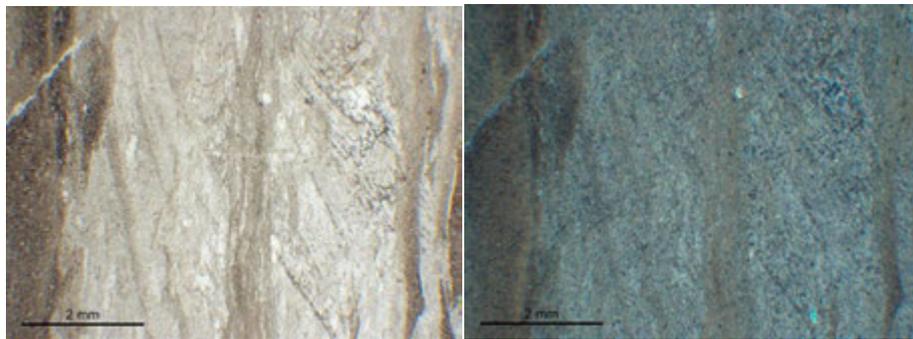


Figure 18 – Histogrammes de répartition des phases minérales sur les échantillons analysés (trait pointillé rouge : limite basse de la zone altérée)

- **Les sulfates**

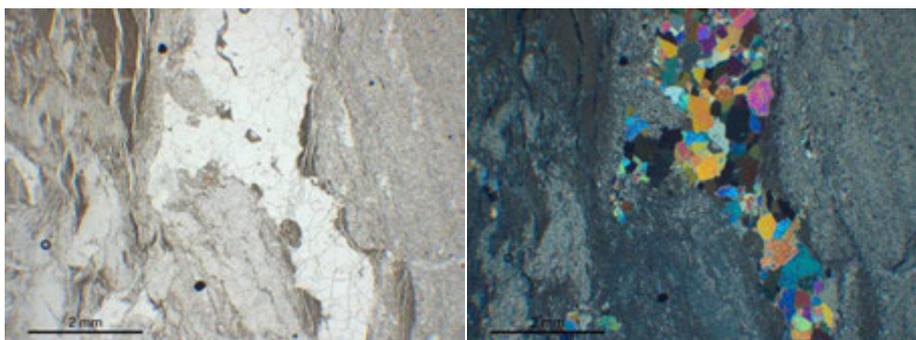
L'anhydrite et le gypse sont les deux phases sulfatées détectées en lames minces et par DRX<sup>6</sup>. Les résultats des analyses minéralogiques peuvent être synthétisés, et illustrés, comme suit :

- les deux formes de sulfate de calcium représentent entre 0 et 88% volumiques des échantillons analysés. En moyenne sur les quatre forages, les échantillons comprennent 43% volumiques d'évaporites (zone altérée et zone intègre indifféremment), 52,6% en zone non altérée, et 1,3% en zone altérée (si l'on exclut l'échantillon à nodules SC4-1 qui contient 18% de gypse) ;
- le gypse est toujours secondaire, c'est-à-dire issu de l'hydratation de l'anhydrite, sauf sur un échantillon (SC4-19, prélevé à 42 m de profondeur), où il est primaire et sous forme microcristalline en forme de feuillets fins ;



**Figure 19 – Vue de lamines comprenant du gypse primaire (28%) et de l'anhydrite (35%) en lumière polarisée non analysée (à gauche) et en lumière polarisée et analysée (à droite) (échantillon SC4-19)**

- les deux formes de sulfate de calcium se présentent :
  - en nodules, le plus souvent de nature gypseuse en remplacement de l'anhydrite, comprenant fréquemment des macrocristaux et/ou des microcristaux également. Des cristaux d'anhydrite résiduelle peuvent encore être présents à l'intérieur des nodules.



**Figure 20 – Vue d'un nodule d'anhydrite en lumière polarisée non analysée (à gauche) et en lumière polarisée et analysée (à droite) (échantillon SC6-12)**

<sup>6</sup> GeoRessources avait, suite à un protocole analytique mal adapté, détecté de la bassanite dans les échantillons. Il s'agit d'une forme héli-hydratée intermédiaire entre l'anhydrite et le gypse. E. Pimentel a précisé dans son expertise qu'il s'agissait certainement d'un artefact d'analyse. Les contre-analyses demandées à GeoRessources par GEODERIS ont montré qu'effectivement, la bassanite était absente des échantillons, et qu'il s'agissait en réalité de gypse partiellement déshydraté par la préparation des échantillons.

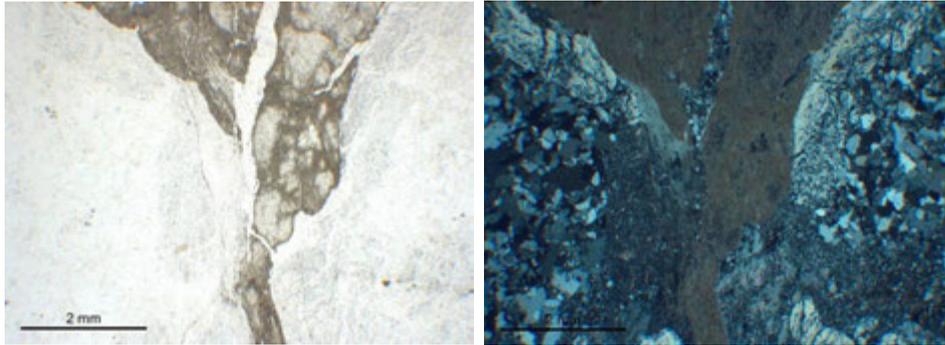


Figure 21 – Vue de portions de nodules de gypse en lumière polarisée non analysée (à gauche) et en lumière polarisée et analysée (à droite) (échantillon SC4-17)

- en microcristaux disséminés, c'est-à-dire en imprégnation, dans l'encaissant, c'est-à-dire dans le sédiment argileux ou marneux, pouvant être de nature anhydritique ou gypseuse ;

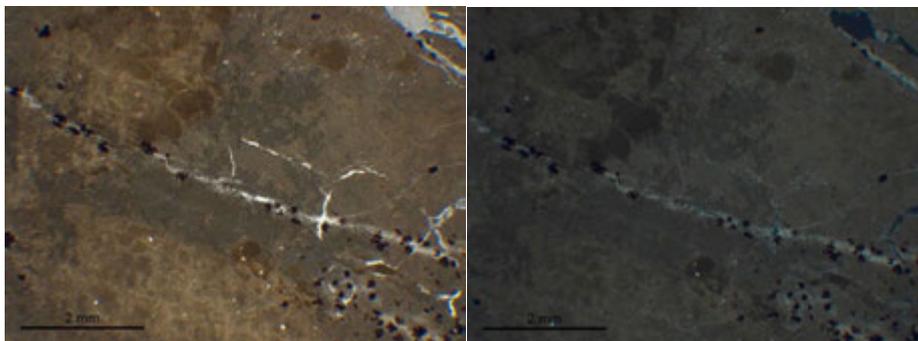


Figure 22 – Vue de microcristaux de gypse disséminés dans la matrice marneuse en lumière polarisée non analysée (à gauche) et en lumière polarisée et analysée (à droite) (échantillon SC4-3)

- en lamines, c'est-à-dire en très fines couches horizontales d'épaisseur comprise entre quelques mm et 2 centimètres, souvent sous forme de macrocristaux, et aussi de microcristaux, fins et allongés, se développant en repoussant les fines couches d'argiles (figures en « *crack-and-seal* » : obturation, par des cristallisations, des volumes créés par la croissance des cristaux).

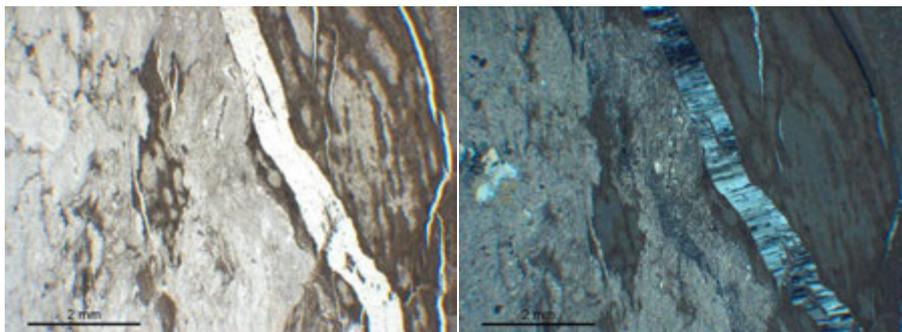


Figure 23 – Vue de macrocristaux de gypse en croissance entre les lamines (figure « *crack-and-seal* ») en lumière polarisée non analysée (à gauche) et en lumière polarisée et analysée (à droite) (échantillon SC6-10)

- en remplissage de micro-fractures (très fréquent sur le forage SC7). Figures en « *crack-and-seal* » très fréquentes. Il semble que le gypse ait précipité dans les fractures à partir de solutions riches en sulfate de calcium (on note l'absence d'anhydrite dans les fractures) et non en remplacement d'anhydrite *in situ*.

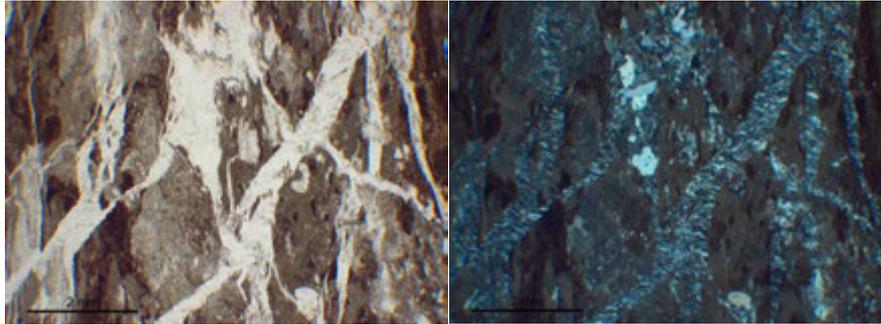


Figure 24 – Vue de macrocristaux de gypse en croissance entre les lamines et dans des fractures (figures « *crack-and-seal* ») en lumière polarisée non analysée (à gauche) et en lumière polarisée et analysée (à droite) (échantillon SC7-5)

À l'observation des histogrammes de la Figure 18, on note que la part d'évaporites est faible dans la zone altérée, à hauteur de quelques % (les calculs donnent une valeur de 1,3% en moyenne), et beaucoup plus importante dans la zone intègre, entre 30% et 85% généralement (en moyenne 52,6%). Concernant la part de chaque phase sulfatée, le lecteur est invité à se reporter à l'Annexe 8 qui présente des diagrammes circulaires présentés sur la verticale de chaque forage, et recalés en altitude.

La répartition spatiale des deux phases sulfatées est examinée dans le détail au paragraphe suivant (§ 7.2.3.3).

Enfin, de l'amarantite, qui est un sulfate de fer hydraté, est présente en très faible quantité, de l'ordre de 1%, sur un échantillon unique SC7-8, prélevé à 45,8 m. Il s'agit d'un minéral relativement rare, *a priori* d'origine évaporitique également.

- **Le quartz**

Le quartz est observé à tous les niveaux analysés, à des proportions comprises entre 0,1% (échantillon nodulaire SC4-17 à 36,15 m) et 46,0% (échantillon SC7-1 à 12,8 m). Aucun faciès sableux ou gréseux n'ayant été observé sur les carottes, il s'avère que le quartz constitue la fraction silteuse présente dans les argilites. On notera en outre la présence de petites lamines siliceuses observées très rarement, dans les premiers mètres du forage SC4 et au niveau de l'affleurement sur la propriété Matjeka, qui témoignent de la présence de silice diagenétique, sous forme de silicifications des dépôts argileux préexistants [4].

- **Les feldspaths**

Deux feldspaths apparaissent dans quelques résultats analytiques : l'orthoclase (ou orthose) (de l'ordre de 4-7% sur de rares échantillons), et l'albite (de l'ordre de 1-2% sur quelques échantillons). Ils sont d'origine détritique.

- **Les carbonates**

De la dolomite, de la calcite et de la magnésite sont présentes sur l'ensemble des échantillons, dans des proportions très variables. Ils présentent une très fine granulométrie, et sont liés aux phases argileuses pour composer les marnes, qui sont donc plus ou moins calcaires, dolomitiques ou à tendance magnésienne. Ces carbonates donnent aux terrains des caractères plus massifs, ayant moins tendance au délitement que les terrains plus argileux.

Il a été vu plus haut que la part des carbonates est relativement faible en zone intègre (10-20% généralement), et plus importante en zone altérée (40-60% généralement), certainement du fait de la disparition des évaporites.

- **La pyrite**

Un seul échantillon contient de la pyrite à hauteur de 2% : SC5-2 prélevé à 7,0 m de profondeur. Ce sulfure de fer est présent dans les terrains qui se sont déposés en milieu réducteur.

### 7.2.3.3 Répartition spatiale de l'anhydrite et du gypse

Après l'identification par GEODERIS de la zone intègre, qui contient encore sa part initiale d'évaporites, et de la zone altérée, où l'anhydrite et le gypse ont disparu par dissolution, E. Pimentel a proposé une division de cet ensemble en trois couches, en se basant sur leur potentiel de gonflement. Les terrains sont divisés en :

- une zone altérée qui correspond à une couche où la transformation de l'anhydrite est complètement terminée, et où le gypse est totalement dissous par les circulations des eaux d'infiltration (« *leached section* ») ;
- une zone gonflée (« *fully swollen section* ») où la transformation de l'anhydrite en gypse est terminée, mais où le gypse est toujours présent. Cette transformation a pu commencer naturellement avec l'infiltration d'eau depuis l'aquifère de la zone altérée, toutefois elle s'est certainement largement intensifiée avec les arrivées d'eau du forage géothermique ;
- une zone intègre (« *unaltered Gipskeuper* »), où il reste de l'anhydrite intacte.

La zone intègre définie initialement est donc séparée en une zone gonflée et une zone intègre *sensu stricto*. La limite entre la section gonflée et la Keuper intègre est nommée « niveau à anhydrite » ou « *anhydrite level* ». La limite entre zone altérée et zone gonflée est nommée « niveau à gypse » ou « *gypsum level* ».

Le tableau ci-dessous reprend les profondeurs et les altitudes du contact zone altérée / zone intègre et de la nappe actuelle.

Forages	Profondeur base zone altérée (m)	Altitude base zone altérée / toit zone gonflée (m NGF)	Profondeur base zone gonflée (m)	Altitude base zone gonflée / toit zone intègre (m NGF)	Altitudes de la surface piézométrique (m NGF)
SC4	8,5	211,8	40 ?	180 ?	208,8 – 210,5
SC5	18,6	211,45	25	205	208,6 -210,5
SC6-2	17,35	208,45	22	204	208,8 – 210,7
SC7	9,8	234,0	42 ?	201 ?	222,5 – 223,2

**Tableau 1 - Profondeurs et les altitudes des limites zone altérée / zone gonflée / zone intègre et de la nappe actuelle**

On remarque qu'à un ou deux mètres près, pour les forages SC4 à SC6-2, la base de la zone altérée correspond à la surface piézométrique actuelle. La zone altérée correspond donc d'un point de vue hydrogéologie actuelle, à la zone non saturée, et la zone gonflée à la zone aquifère. Concernant SC7, la zone altérée est également non saturée, ainsi que la partie supérieure (10 m) de la zone gonflée.

De ces observations minéralogiques et piézométriques, il est possible de déduire qu'un premier aquifère a dû se développer, certainement bien avant l'existence du village de Lochwiller, durant le Quaternaire, dans les premiers mètres sous la surface, par l'infiltration des eaux météoriques. La pente de la colline drainait certainement ce ruissellement hypodermique vers le pied de la colline, puis vers le Dachsgaben (il sera vu plus loin au

§ 7.3.3.3 que les eaux de ce ruisseau présentent un faciès sulfaté calcique non négligeable). Des sources, selon le témoignage d'habitants, apparaissaient, il y a de nombreuses années, en période humide au nord de la maison Salins.

Ce ruissellement de subsurface a vraisemblablement hydraté l'anhydrite présente (on la retrouve partiellement intacte dans le forage SC7 en profondeur si l'on corrèle les bancs) en gypse, a dissous le gypse par apport d'eaux peu minéralisées, donc sous-saturées vis-à-vis du gypse, et tassé les terrains. Les solutions riches en sulfate de calcium ont pu précipiter plus loin ou être drainées vers le Dachsgaben.

Le milieu plus profond a été perturbé par les arrivées d'eau issues du forage géothermique, puis des réseaux d'égout qui se sont disloqués par suite du gonflement. Des eaux d'origine profonde et issues de l'infiltration de la pluie ont commencé à circuler plus en profondeur, dans la zone actuellement gonflée (2016) et la zone intègre qui n'étaient vraisemblablement pas le siège de circulations d'eau. Elles ont provoqué le gonflement de l'anhydrite, ce qui a augmenté la perméabilité des terrains par l'apparition de décollements des lamines rocheuses et de fractures. L'aquifère se serait donc déplacé en profondeur, reproduisant le processus décrit ci-dessus d'hydratation de l'anhydrite en gypse.

La répartition des sulfates dans l'espace est représentée graphiquement dans l'Annexe 8 à l'aide de diagrammes circulaires, qui représentent la part d'évaporites au sein de l'échantillon analysé, et ce pour chaque forage carotté.

Cette figure comprend en outre :

- des lettres « ALT » pour représenter la zone altérée, « GFL » pour la zone gonflée, et « INT » pour la zone intègre, telles qu'elles ont été définies par les observations pétrographiques (cf. § 7.2.2) mais surtout minéralogiques décrites ci-dessous ;
- des indications d'humidité des terrains :
  - o telle qu'elle a été observée par le technicien de GEODERIS en charge du suivi des forages (cette observation est rendue difficile par la présence de l'eau servant à la foration) ;
  - o via les résultats des analyses géotechniques (cf. Annexes 7 et 12) : teneur en eau « naturelle » et degré de saturation de la roche.
- les niveaux d'eaux mesurés en octobre 2015 et mai 2016 ;
- la mention des pertes de fluide de forage.

#### Observations sur la répartition des sulfates dans la zone altérée non saturée

Du point de vue minéralogique, dans la zone altérée non saturée des forages SC4, SC5 et SC6-2, on retrouve du gypse sur SC4 (SC4-3), et plutôt de l'anhydrite sur SC5 (SC5-2 et SC5-4), et sur SC6 (SC6-1 et SC6-4). Les teneurs analysées sont de 1 à 2%, sauf sur l'échantillon particulier SC4-1, qui comprend les nodules calcaires et qui contient 18% de gypse. Cette part très faible de minéraux sulfatés constitue visiblement un résidu des transformations minéralogiques et du lessivage précités. Aucun échantillon de la zone altérée de SC7 n'a été analysé d'un point de vue minéralogique.

## Observations sur la répartition des sulfates sous la zone altérée et au-dessous du niveau hydrostatique actuel

### ✓ Forage SC4

Sous le niveau de la nappe actuelle, situé vers +209-210 m NGF, les terrains sont apparus humides sur 5 m, puis légèrement humides sur 6 m, puis en apparence secs sur les 21 m les plus profonds. Les teneurs en eau mesurées corroborent majoritairement ces observations (9-10% à 6 m et 10 m sous le niveau de la nappe, puis 8-10% plus en profondeur).

Les analyses minéralogiques de l'ensemble des échantillons fournissent des indications de fortes teneurs en minéraux sulfatés, comprises entre 20% (SC4-6) et 88% (SC4-17), et en moyenne de 55%. Le gypse est majoritaire sur l'ensemble des échantillons (en moyenne 51,3% de gypse, 3% d'anhydrite) à l'exception de l'échantillon le plus profond (SC4-19) qui présente une composition de 27% de gypse et 38% d'anhydrite. Selon GeoRessources, ce gypse est primaire (unique échantillon de gypse primaire sur les quatre forages). Vers 22 m de profondeur, les terrains sont apparus plus secs. Les proportions importantes de gypse même en profondeur, par rapport à celles d'anhydrite, montrent que le gonflement se produirait également en profondeur, du fait de fuites du forage géothermique à ces niveaux. Le seul échantillon rocheux où le gypse serait primaire (daté du dépôt des couches sédimentaires au cours du Keuper) est le SC4-19. Le gonflement, au vu des informations minéralogiques, semble se produire sur la tranche <180-210 m NGF, soit entre 10 m et 40 m de profondeur au moins. Le forage SC4 est donc implanté dans la zone altérée (épaisse de 8 m environ) et dans la zone gonflée par des eaux très probablement issues du forage géothermique fuyard. La zone intègre serait peut-être recoupée dans le fond.

### ✓ Forage SC5

Il est rappelé que ce forage se situe à l'épicentre du gonflement. Sous la nappe, les terrains sont, comme pour le forage SC4, apparus humides, sur 4 m, puis légèrement humides, sur les 8 derniers mètres. Les teneurs en eau fournissent des valeurs de 7,1% à 3 m sous la nappe, et 4,2% à 9 m sous la nappe. Ce forage atteint des niveaux beaucoup moins profonds que le forage SC4.

Les minéraux sulfatés représentent 46 à 85% du volume rocheux. Les deux premiers échantillons sous la base de la zone altérée (SC5-9 et SC5-11) ne comprennent quasiment que du gypse (84% et 83% respectivement, contre 0 et 1% d'anhydrite respectivement), correspondant à la zone gonflée. L'échantillon SC5-11 correspond au banc gypseux qui a servi aux corrélations (cf. § 7.2.1.4), voir photo ci-dessous.



**Figure 25 – Echantillon SC5-11 (morceau du banc bréchique ayant servi aux corrélations) : 83% de gypse**

Le troisième (SC5-18), comprend 18% d'anhydrite et 52% de gypse. Le quatrième (SC5-13) n'est composé que d'anhydrite (52%) et de traces de gypse (2%), et le dernier (SC5-15) plutôt de gypse (33%), et d'un peu d'anhydrite (13%). Ces trois derniers seraient plutôt dans la zone intègre, au vu de la présence d'anhydrite.

À la lecture de ces valeurs, on constate que les transformations minéralogiques paraissent très avancées sur les 4 premiers mètres sous la base de la zone altérée, avec majoritairement du gypse en présence, mais que plus en profondeur, l'anhydrite reste encore relativement présente (18%, 52% et 13% sur les trois échantillons). Les transformations minéralogiques sont moins avancées en profondeur, toutefois les minéralogistes estiment que le gypse est toujours secondaire. Le gonflement concernerait donc l'ensemble de la zone gonflée et de la zone intègre recoupée par le forage, soit la tranche <197-211 m NGF.

✓ Forage SC6

Ce forage est situé en aval pendage par rapport au forage géothermique et par rapport à l'épicentre du gonflement. Il semble que le gonflement soit apparu plus tard que sur l'impasse du Koelberg.

Le niveau d'eau dans ce forage correspond à ceux observés dans les forages SC5 et SC6 (entre 209 m NGF et 211 m NGF environ).

Sous la nappe, et à la base de la zone altérée, les trois premiers échantillons mettent en évidence la présence très largement majoritaire de gypse, respectivement 64%, 85% et 51%, respectivement à 0,1 m, 3 m et 5 m sous le toit de la zone altérée. Les terrains dans cette tranche sont apparus légèrement humides. La teneur en eau est de l'ordre de 13-14% (deux mesures à -0,5 m et -6 m sous le niveau hydrostatique). Il s'agit ici de la zone gonflée. Plus bas, les terrains sont apparus secs à l'observation, les teneurs en eau le confirment puisqu'à -8 m sous la nappe, elle a décru à 9,1%, et à -13 m, elle n'est plus que de 4,2%. Dans ces niveaux plus secs, la transformation des minéraux sulfatés est peu engagée (zone intègre). Tout d'abord concernant le banc rose qui a servi aux corrélations, et qui contient uniquement du gypse à 83% dans le forage SC5, celui-ci contient dans le forage SC6, 86% de minéraux sulfatés, dont cette fois-ci 74% d'anhydrite et 11% de gypse (échantillon SC6-10) (voir photo ci-dessous). Les deux échantillons prélevés plus bas (SC6-12 et SC6-14) vers le fond du forage contiennent un mélange d'anhydrite et de gypse, toujours caractéristiques de la zone intègre.



**Figure 26 – Echantillon SC6-10 (morceau du banc bréchique ayant servi aux corrélations) : 74% d'anhydrite et 11% de gypse**

Globalement sur ce forage, la tranche humide qui comprend l'aquifère et où des transformations minéralogiques sont abouties au vu de la présence largement majoritaire de gypse, est située entre 203 et 209 m NGF. C'est dans cette tranche que le gonflement s'est initié. La persistance d'anhydrite sur les trois échantillons les plus profonds indique que les transformations sont moins avancées qu'au droit des forages SC4 et SC5, il s'agit de la zone intègre. On peut localiser le gonflement, au vu des données minéralogiques, sur toute la hauteur de la zone gonflée et de la zone intègre recoupée par le forage SC6 : <194-208 m NGF.

## ✓ Forage SC7

Le forage SC7 est situé en principe à l'extérieur de la zone actuellement en surrection. Le niveau d'eau est beaucoup plus superficiel que sur les trois autres forages. Il se situe autour de 223 m NGF. Sachant que la crépine est positionnée entre 197,5 m NGF et 209,5 m NGF, le niveau d'eau mesuré correspond à une charge hydraulique présente dans les bancs sous-jacents. L'aquifère semble devenu captif au droit du forage SC7 du fait de l'imperméabilité des niveaux sus-jacents. Lors des prélèvements d'eau réalisés en octobre 2015 (cf. § 7.3), ce piézomètre réalimentait très bien lors de la phase de purge, ce qui, dans ce milieu très argileux, laisse penser que des circulations d'eau se produisent à la faveur de niveaux fissurés.

Cinq mesures de teneur en eau sont disponibles : les trois premières, comprises entre 7 m et 15 m sous la surface de la nappe, indiquent des valeurs autour de 14-15%, laissant penser que de l'eau circule dans les terrains.

Il semble que dans le forage SC7, on soit en présence d'une zone altérée comprise entre la surface et 9,8 m de profondeur, d'une zone gonflée située entre 9,8 m et 40 m de profondeur, et enfin d'une zone intègre entre 40 m et 46 m. Cette zone gonflée pourrait être naturellement moins riche en évaporites, toutefois les corrélations avec les couches recoupées en SC6 vont plutôt dans le sens d'une disparition des évaporites. Il s'agit certainement d'une couche où les eaux d'infiltration ont circulé à une profondeur importante, ont permis le gonflement de l'anhydrite en gypse, et l'ont partiellement dissous.

Les carottes dans la zone altérée n'ont pas été analysées. Dans la zone gonflée, les teneurs en évaporites sont comprises entre 1% et 37% de gypse, et les teneurs en anhydrite entre 3% et 4%, sachant que l'estimation visuelle des teneurs en évaporites est comprise entre 5% et 20% environ sur cette zone. Enfin, la zone intègre, analysée sur 4 échantillons, présente une teneur moyenne en gypse de 31% (valeurs comprises entre 15% et 66%) et une teneur moyenne en anhydrite de 25% (valeurs comprises entre 13% et 47%). Le gypse est minoritaire.

Le banc rose-orangé d'aspect bréchiq ue qui a permis les corrélations entre les couches contient, au droit du forage SC7, majoritairement de l'anhydrite (46,9%), ainsi que du gypse (15%).



**Figure 27 – Echantillon SC7-16 (morceau du banc bréchiq ue ayant servi aux corrélations) : 47% d'anhydrite et 15% de gypse**

En résumé, sur ce forage, on retiendra la présence d'une zone altérée de 10 m (absence d'évaporites), d'une zone gonflée de 30 m (peut-être en moyenne 10% d'évaporites environ), et d'une zone intègre sous-jacente (environ 50% d'évaporites). Cela semble signifier une évolution minéralogique, peut-être à l'échelle du Quaternaire au vu de l'absence de crevasses et d'indices de surrection. Le dernier levé de nivellement effectué fin mars 2016 montre de très légères variations, avec une surrection de 1,7 cm en six mois, ce qui n'est pas significatif d'un mouvement de terrain et pourrait être liés aux variations de température

extérieure, d'humidité des sols de surface, etc. Il est donc difficile de savoir si ce secteur est concerné par le gonflement tel qu'il se produit à l'aval. Il semblerait que ce ne soit pas le cas, au vu des teneurs en eau qui sont faibles dans ces niveaux rocheux, toutefois, la bonne réalimentation du piézomètre lors du pompage indique tout de même des circulations d'eau certainement à la faveur de fissures, qui sont nombreuses en profondeur.

Si l'hypothèse d'une zone gonflée naturellement est juste, il est probable qu'une zone gonflée préexistait également sur les forages du lotissement avant la réalisation du forage géothermique. Toutefois les transformations se produisaient extrêmement lentement, du fait des circulations d'eau très lentes, et la surrection n'était pas ressentie.

## 7.3 Données relatives aux eaux souterraines

### 7.3.1 Données hydrogéologiques

#### 7.3.1.1 Piézométrie

Des mesures de piézométrie ont été effectuées à différentes reprises depuis la foration des ouvrages SC4 à SC7. Les puits privés « puits communal », « puits Matjeka » et « puits Schorr » ont également fait l'objet de mesures. Certaines nous ont été communiquées par le BRGM-DPSM qui a relevé la piézométrie sur différents ouvrages avant et pendant les essais de colmatage du forage géothermique de l'hiver 2015-2016.

Il s'est avéré que le niveau de la nappe est inférieur à la limite inférieure de la crépine du piézomètre SC6. Il capte la zone non saturée. Les mesures sont donc effectuées dans le SC6-2.

Pour mémoire, les relevés effectués par le géomètre pour le compte du BRGM-DPSM ont fourni les altitudes suivantes pour les ouvrages :

	X	Y	Z	Remarque
<b>Inclino 1 Kandel</b>	1024945,837	6852935,883	220,470	Dessus couvercle
<b>Inclino 2 Belhadj</b>	1024978,057	6852965,760	225,796	Dessus couvercle
<b>Puits Communal</b>	1024934,935	6853050,628	216,384	Marque de peinture sur puits communal
<b>Puits Matjeka</b>	1024916,249	6852986,780	213,127	Marque de peinture sur puits Matjeka
<b>Puits Schorr</b>	1024904,115	6852925,083	211,329	Marque de peinture sur puits Schorr
<b>PZ1 Kandel</b>	1024945,297	6852932,433	220,539	Dessus couvercle

**Tableau 2 – Coordonnées des ouvrages relevés par le géomètre Lambert de Brumath, pour le compte du BRGM-DPSM (Lambert 93)**

Les résultats des mesures sont présentés dans le tableau de la page suivante.

	SC4		SC5		SC6-2		SC7		Puits Schorr		Puits Matjeka		Puits communal	
Cote haut du tube ou repère (m NGF)	220,98		230,05		225,33		243,85		211,33		213,13		216,38	
Dates des mesures	Prof. eau /tube (m)	Cote (m NGF)	Prof. eau /tube (m)	Cote (m NGF)	Prof. eau /tube (m)	Cote (m NGF)	Prof. eau /tube (m)	Cote (m NGF)	Prof. eau /tube (m)	Cote (m NGF)	Prof. eau /tube (m)	Cote (m NGF)	Prof. eau /tube (m)	Cote (m NGF)
17/08/2015	11,9	209,08	21,1	208,95	16,00	209,33	20,64	223,21						
25/08/2015	11,94	209,04	21,05	209,00	16,17	209,16	20,75	223,10						
22/09/2015	11,99	208,99	21,21	208,84	16,29	209,04	20,83	223,02	2,79	208,54			6,07	210,31
08/10/2015	12,07	208,91	21,31	208,74	16,41	208,92	20,83		2,92	208,41	4,73	208,40	6,29	210,10
21/10/2015	12,08	208,90	21,32	208,73	16,41	208,92	21,04	222,81						
22/10/2015									2,90	208,43	4,73	208,40	6,21	210,17
29/10/2015	12,11	208,87	21,35	208,70	16,43	208,90			2,91	208,42	4,78	208,35	6,29	210,09
30/10/2015	12,23	208,75	21,37	208,68	16,44	208,90			3,44	207,89	4,78	208,35	6,29	210,09
02/11/2015	12,11	208,87	21,365	208,69	16,47	208,87			2,89	208,44	4,78	208,35	6,34	210,04
03/11/2015	12,11	208,87	21,36	208,69	16,46	208,87			2,89	208,44	4,775	208,36	6,32	210,06
09/11/2015	12,125	208,86	21,41	208,64	16,51	208,82			2,92	208,41	4,82	208,31	6,33	210,05
10/11/2015	12,02	208,96	21,42	208,63	16,50	208,83			2,94	208,39	4,83	208,30	6,34	210,04
11/11/2015	11,98	209,00	21,42	208,63	16,51	208,82			2,94	208,39	4,84	208,29	6,33	210,05
12/11/2015	11,89	209,09	21,31	208,74	16,41	208,92			2,93	208,40	4,845	208,29	6,34	210,04
17/05/2016	10,65	210,33	19,59	210,46	14,65	210,68	21,35	222,50						
25/05/2016	10,47	210,51	19,54	210,51	14,63	210,70	21,15	222,70						

Tableau 3 – Mesures de piézométrie sur les forages SC4 à SC7 et les puits (la crépine du forage SC6 n'atteint pas la nappe)  
(les données en bleu ont été communiquées par le BRGM-DPSM)

Aucune mesure n'a été prise en compte entre le 15 novembre 2015 et février 2016 car les travaux entrepris par le BRGM-DPSM en vue du rebouchage du forage géothermique ont perturbé la piézométrie sur SC4, SC5 et SC6-2 du fait de pertes de boue de forage conséquentes.

L'évolution dans le temps de ces niveaux est présentée sur les graphiques suivants (Figure 28 et Figure 29, sans SC7). Ils ont présenté une tendance générale à la baisse en automne 2015, sans doute liée à la faible pluviométrie enregistrée en été et en automne. Les niveaux piézométriques sont remontés, au vu des mesures réalisées en mai 2016, certainement du fait de la pluviométrie hivernale, et peut-être également du fait des pertes de boue mentionnées précédemment. Le battement semble faible, mais le nombre de mesures, les perturbations et la période d'investigations courte ne permettent pas de l'évaluer avec précision.

De plus, il apparaît clairement que le niveau d'eau dans le forage SC7 est beaucoup plus élevé en altitude que dans les autres ouvrages. Il est représentatif d'un niveau aquifère à caractère captif. En effet, l'ouvrage a été crépiné entre 197,5 m NGF et 209,5 m NGF, sachant que le niveau d'eau dans les autres ouvrages s'établissait autour de 208,0-211,0 m NGF. Il est apparu que le niveau de l'eau s'est stabilisé dans ce forage SC7 autour de 223 m NGF.

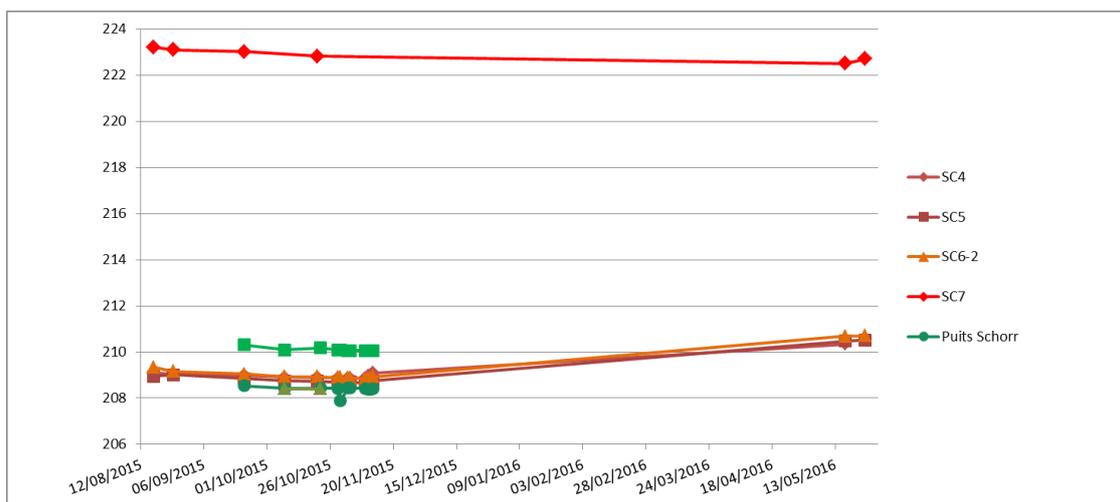


Figure 28 – Evolution des niveaux piézométriques mesurés dans le temps (m NGF)

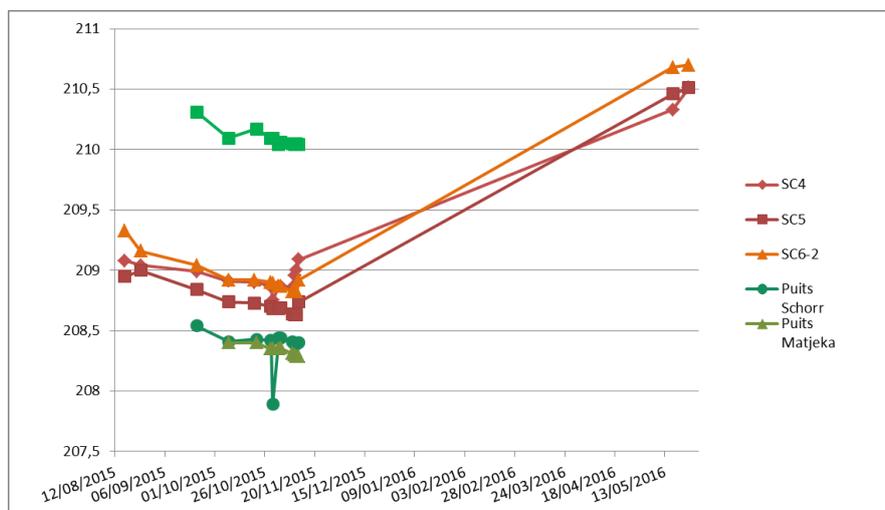


Figure 29 – Evolution des niveaux piézométriques mesurés dans le temps, sans SC7 (m NGF)

Les forages captent un aquifère développé dans les marnes et argilites du Keuper, suite à leur déstructuration consécutive au gonflement de l'anhydrite accéléré par le forage géothermique. Il a été vu plus haut que l'aquifère, qui était certainement peu productif, auparavant localisé sous la surface dans la zone altérée, était en quelque sorte « descendu » dans la zone intègre, devenue par la suite une zone gonflée telle qu'elle a été définie actuellement.

Les trois puits privés captent également le Keuper, certainement la zone altérée qui serait présente en pied de versant. Nous déduisons la présence de cette zone altérée des observations géologiques réalisées par FONDASOL, dans le cadre de l'expertise judiciaire<sup>7</sup>.

Une esquisse de carte piézométrique et un zoom sont proposés dans les deux pages suivantes. L'ensemble des ouvrages captant le Keuper a été connecté au sein d'un unique aquifère. Cela signifie que la zone gonflée au droit du lotissement est suffisamment perméable pour que le gradient hydraulique y soit comparable au gradient plus en aval hydraulique où se trouvent implantés les puits particuliers, en zone altérée. Ceci signifie sans doute aussi que le système s'alimente mal et que la nappe se développe sur une faible épaisseur, ce qui n'est pas étonnant étant donné le contexte argileux. Cette hypothèse de connexion de l'aquifère du lotissement avec les puits du pied de versant est corroborée par les faciès hydrogéochimiques des eaux (voir plus loin), qui mettent en évidence une alimentation du puits Schorr par les eaux du coteau (faciès sulfaté et calcique très marqué).

L'aquifère sous pression capté au piézomètre SC7 serait le prolongement de l'aquifère libre du coteau, passé captif sous la couverture imperméable des terrains de recouvrement, toutefois une incertitude persiste, comme cela est précisé dans l'expertise d'E. Pimentel. Selon lui, si les niveaux piézométriques sont connectés, c'est que nous avons proposé, cela signifierait que la source principale de l'eau souterraine est l'eau de surface, par une alimentation latérale d'est en ouest. Ce ne serait pas, comme cela a pu être envisagé, le forage géothermique. La levée de cette incertitude est importante pour la suite.

Des points d'eau figurant sur la base « Infoterre » du BRGM ont été ajoutés. L'esquisse piézométrique indique une nappe à faible gradient sur les reliefs où l'alimentation doit être très faible compte tenu du contexte argileux ; elle indique également un faible gradient au niveau du village jusqu'au ruisseau Dachsgaben où la transmissivité doit être plus élevée.

Des recommandations sont proposées au § 9, pour lever le doute sur l'appartenance du SC7 au même aquifère que SC4, SC5 et SC6-2, et pour mieux apprécier l'état de captivité supposé de la nappe dans le secteur du SC7. La dynamique de la nappe, qu'elle soit unique ou fragmentée, sera mieux connue.

---

<sup>7</sup> Dans le carottage réalisé dans la cour de la ferme Schorr en 2011 [36], les terrains rencontrés sont (sondage R1) : du remblai jusqu'à 0,4 m, du limon argileux gris-vert et beige légèrement sableux avec cailloutis jusqu'à 0,7 m (limons quaternaires probablement), puis de la marne gris-mauve à mauve jusqu'à 3 m de profondeur, caractéristique du Keuper. Aucun niveau évaporitique n'est mentionné, alors que la corrélation des bancs indique que cette tranche de terrains correspond aux terrains compris *grosso modo* entre 203 m et 206 m dans le forage SC4. Ces derniers comprennent 20 à 30% d'évaporites. Le niveau de l'eau dans le puits Schorr, qui se situe autour de 2,8 m indique bien que l'aquifère capté par le puits est constitué par les terrains du Keuper, qui se sont avérés altérés sur au moins 3 m. De plus, dans le carottage SC3, réalisé également par FONDASOL, en 2013 [37], dans la cour de la maison Matjeka, les terrains du Keuper apparaissent à partir de 0,8 m de profondeur. Des marnes et argiles grises, beiges, vertes ou bariolées sont décrites jusqu'au fond du forage situé à 10 m. Hormis un mince niveau à anhydrite entre 1,43 m et 1,60 m, celle-ci n'apparaît plus qu'à 7,50 m. Il serait donc possible de considérer une zone altérée de 7-8 m environ en pied de versant. Le puits Matjeka capte également des eaux du Keuper puisque son niveau se situe autour de 4,8 m de profondeur.

On note par ailleurs, à la vue des mesures piézométriques du Tableau 3, que le niveau piézométrique dans le piézomètre SC4 est souvent légèrement supérieur (10-20 cm) à celui du piézomètre SC5, ce dernier étant pourtant situé à l'amont hydrogéologique tel qu'on le suppose. Ce phénomène peut s'expliquer par l'alimentation en eau profonde qui se produit par le forage géothermique, et qui fait monter artificiellement le niveau du SC4. Cette hypothèse est proposée également par E. Pimentel dans son expertise.

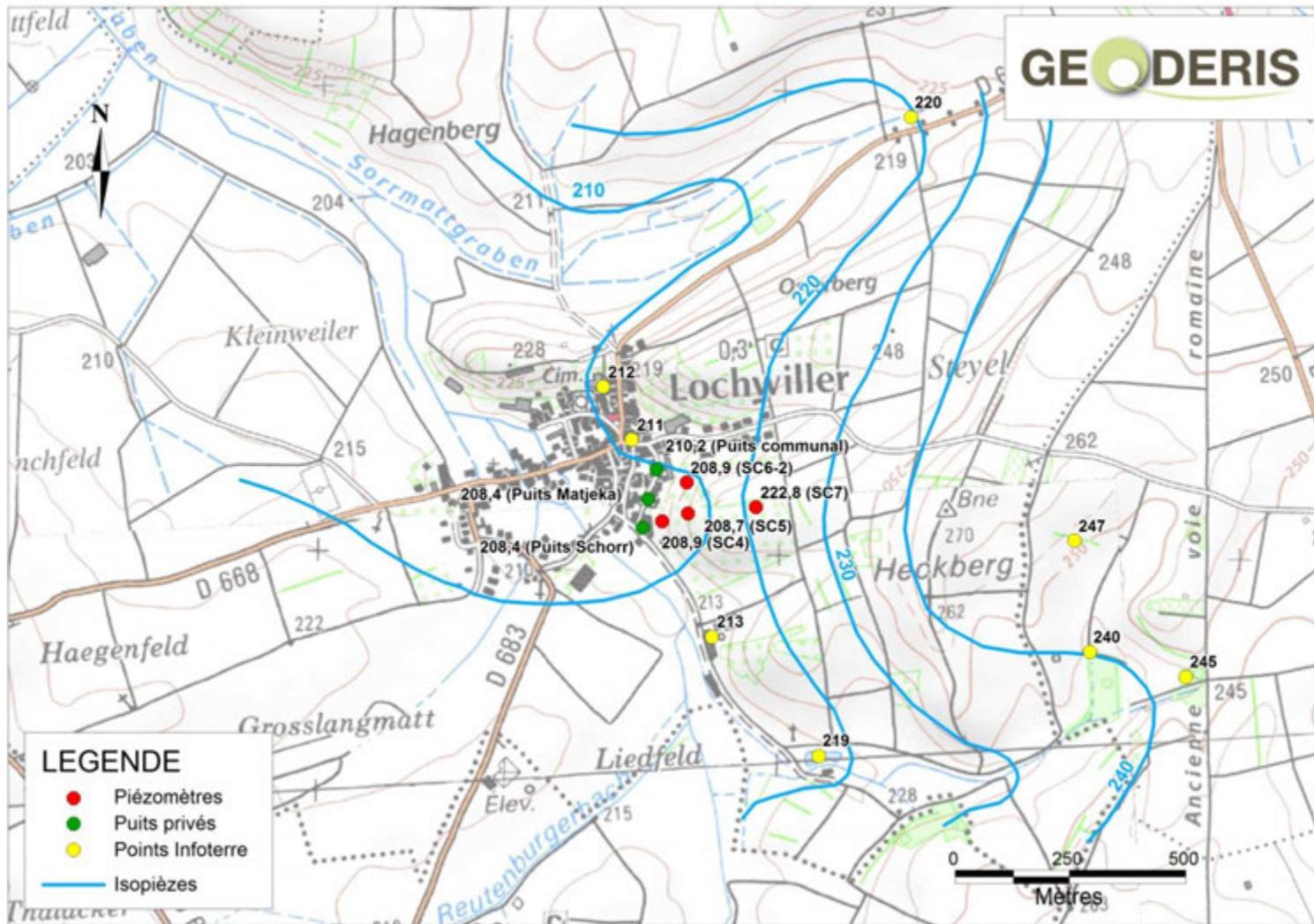


Figure 30 – Esquisse de carte piézométrique du Keuper dans le secteur de Lochwiller (cotes de la nappe en m NGF)

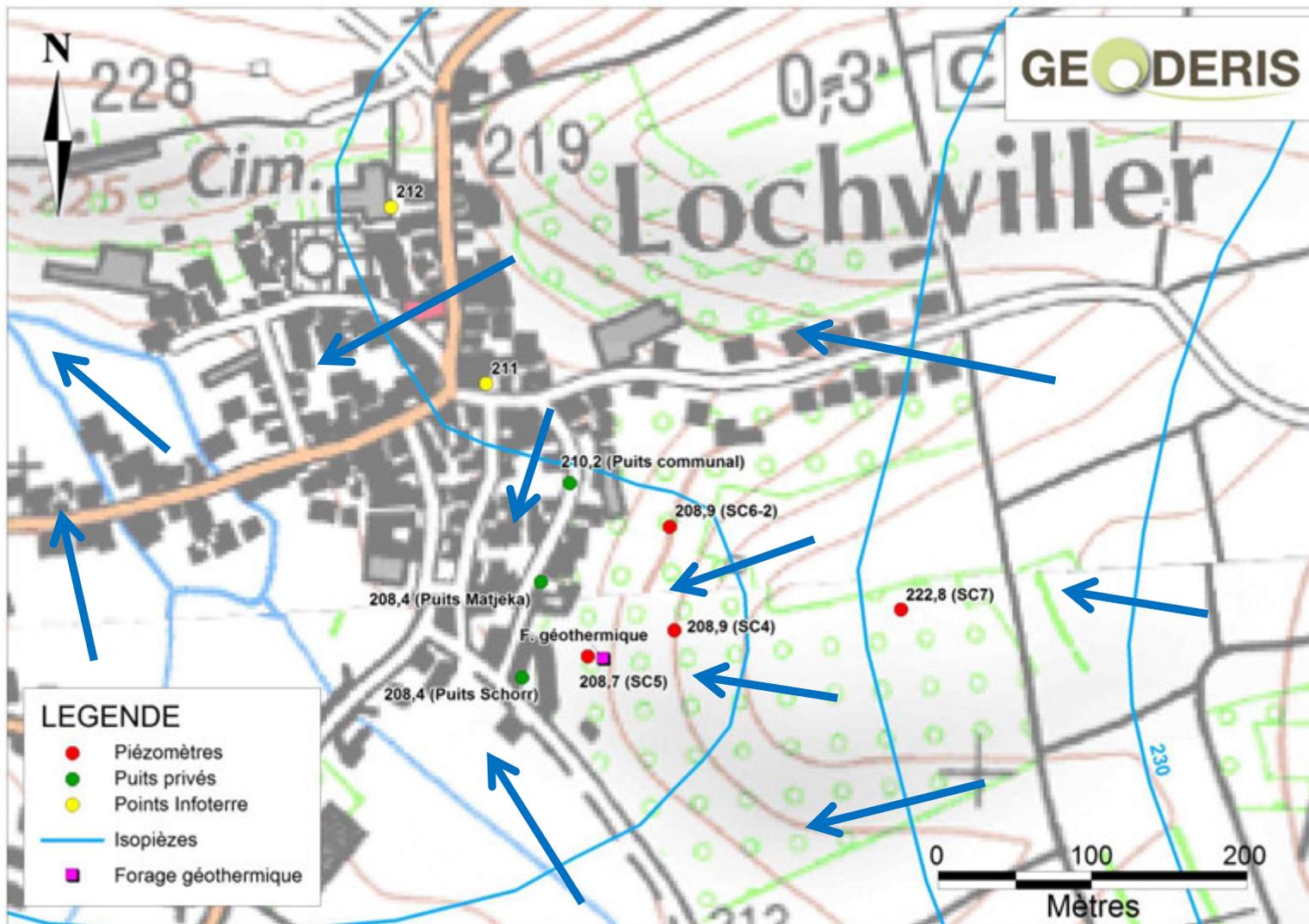


Figure 31 – Zoom sur l'esquisse de carte piézométrique du Keuper avec lignes de courant (sens de circulation de l'eau souterraine) (cotes de la nappe en m NGF)

### 7.3.1.2 Observations concernant la perméabilité des terrains

Des prélèvements d'eaux souterraines ont été effectués les 21 et 22 octobre 2015, par nos soins, à l'aide d'une pompe immergée, permettant le renouvellement de la colonne d'eau à au moins trois reprises (norme XP-31615). À cette occasion, il a été constaté que certains piézomètres réalimentaient bien : c'est le cas de SC5 et SC7, et que d'autres se vidaient très rapidement, c'est le cas des forages SC4 et SC6-2. Ces observations sont cohérentes avec les résultats obtenus par l'entreprise de forages lors du développement des ouvrages (cf. § 7.1.4). Ce phénomène tient probablement à la présence, ou à l'absence de fissures ouvertes permettant des circulations d'eaux, recoupées par le forage.

Les pertes totales de boue signalées au § 7.1.2 sur SC4 à 211 m NGF (9 m de profondeur) se situent au-dessus de la nappe. La fissure ou le niveau perméable rencontré n'ont pas d'impact sur la perméabilité des terrains au niveau de la crépine.

Sur SC7, la perte de boue a été signalée à 39,10 m (204,4 m NGF). Il s'agit d'un niveau ou d'une fissure situé dans le niveau crépiné, il ou elle peut donc être responsable des circulations d'eaux importantes observées dans le piézomètre SC7.

### 7.3.2 Données de température et de conductivité électrique des eaux

Des diagraphies de température et de conductivité électrique des eaux souterraines ont été effectuées dans les forages SC4, SC5, SC6-2 et SC7 le 25 mai 2016. Le forage SC6 n'a pas fait l'objet de mesures, car le niveau de la nappe est inférieur à la limite inférieure de la crépine. Il capte la zone non saturée.

Il est rappelé que la transformation de l'anhydrite en gypse est un phénomène exothermique. La littérature issue de la profession des plâtriers indique que la chaleur de réaction de la transformation bassanite/gypse est de 17 kJ/mol. Compte tenu de la capacité calorifique de l'eau de 4,18 kJ/kg/°C, l'hydratation d'une mole de bassanite (145 g) permet de réchauffer d'environ 4°C une masse de 1 kg d'eau. Ceci explique l'augmentation de température de 4 à 5°C qui a été mise en évidence par les mesures (voir ci-dessous).

Le 25 mai 2016, une sonde Diver a été descendue lentement dans chaque ouvrage investigué, pour ne pas perturber l'équilibre instauré. La sonde a été calibrée pour produire une mesure à un pas de temps de trois minutes<sup>8</sup>. Entre chaque mesure, la sonde a été descendue manuellement de 50 cm.

Les résultats obtenus, recalés en altitude, sont fournis dans les graphiques suivants. Les axes des graphiques présentent les mêmes intervalles de température et de conductivité électrique, afin de pouvoir être comparés les uns aux autres. Certaines parties des piézomètres sont constituées de tube plein, où les eaux sont potentiellement stagnantes, et non de tube crépiné. Cela est présenté sur les graphiques.

On note tout d'abord que les eaux du forage SC7, situé en théorie en dehors de la zone impactée par le gonflement actuel et les désordres, présentent des températures évoluant quasiment linéairement avec la profondeur. Elles sont comprises entre 11,24 et 11,85°C, ce qui aboutit à un gradient géothermique de 2,3°C pour 100 m<sup>9</sup>. Contrairement à ce qui avait été pressenti suite aux mesures de température de septembre 2015, il ne semble pas y avoir

<sup>8</sup> Le rapport projet présentait des mesures réalisées en septembre 2015 avec un pas de temps d'une minute. La sonde Diver, après essais dans nos locaux sur des eaux de températures différentes, a montré un temps de stabilisation de 2 minutes et 30 secondes environ. En conséquence, les mesures de septembre ne sont pas reproduites ici. Des mesures supplémentaires ont été réalisées le 25 mai 2016 au pas de temps de 3 minutes.

<sup>9</sup> À comparer avec le gradient géothermique moyen, qui est de 3°C/100 m.

de gonflement d'anhydrite intense (par opposition à un gonflement « naturel » d'intensité plus faible dans les terrains recoupés par le SC7). Une température légèrement plus élevée est mesurée sous la surface de l'eau. C'est le cas pour l'ensemble des ouvrages. Il n'est pas aisé de déterminer s'il s'agit d'une influence de la surface du sol, d'un temps de réponse de la sonde, ou d'un gonflement d'anhydrite accentué en surface de nappe.

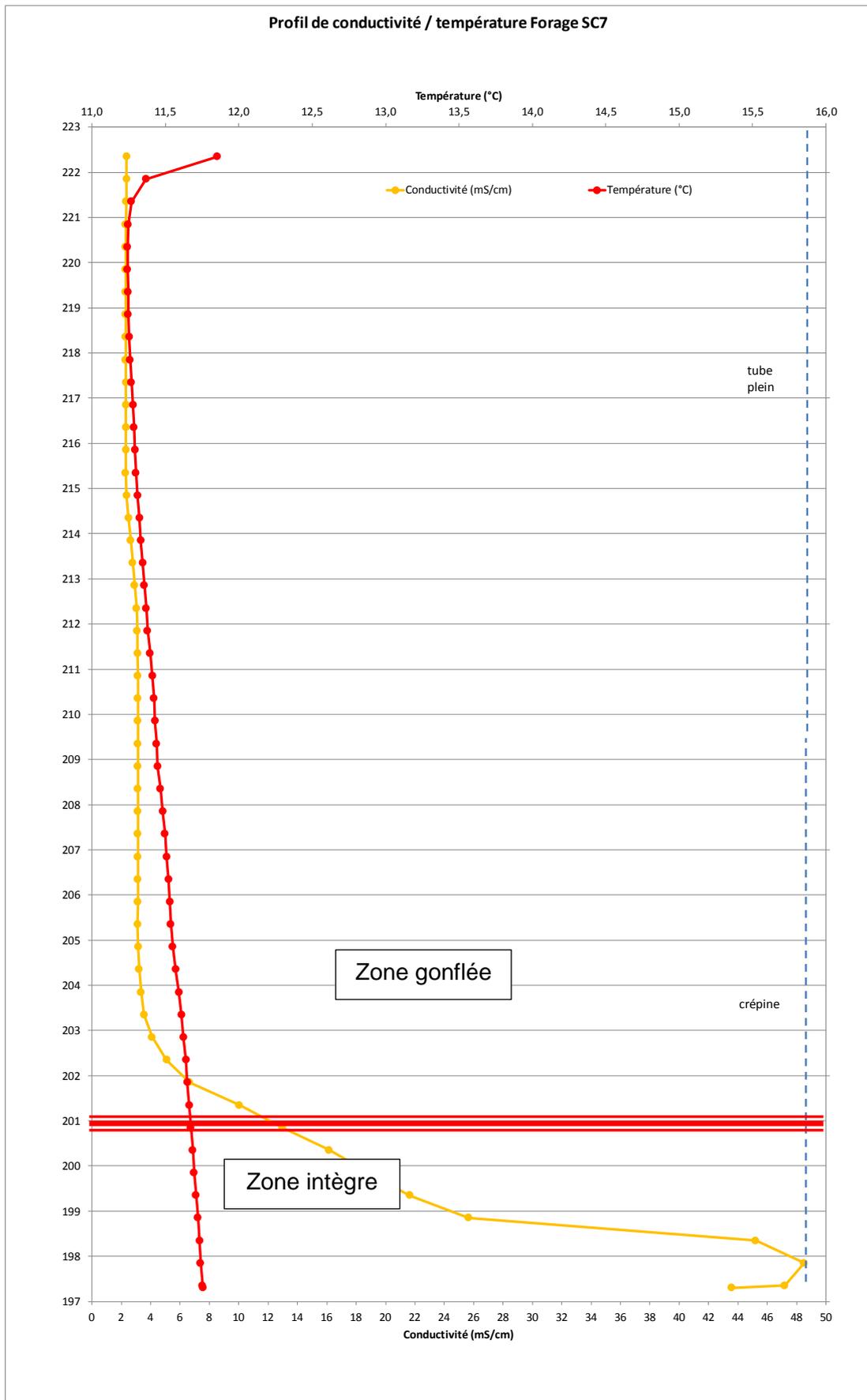


Figure 32 – Profils de conductivité électrique et de température sur les eaux du forage SC7

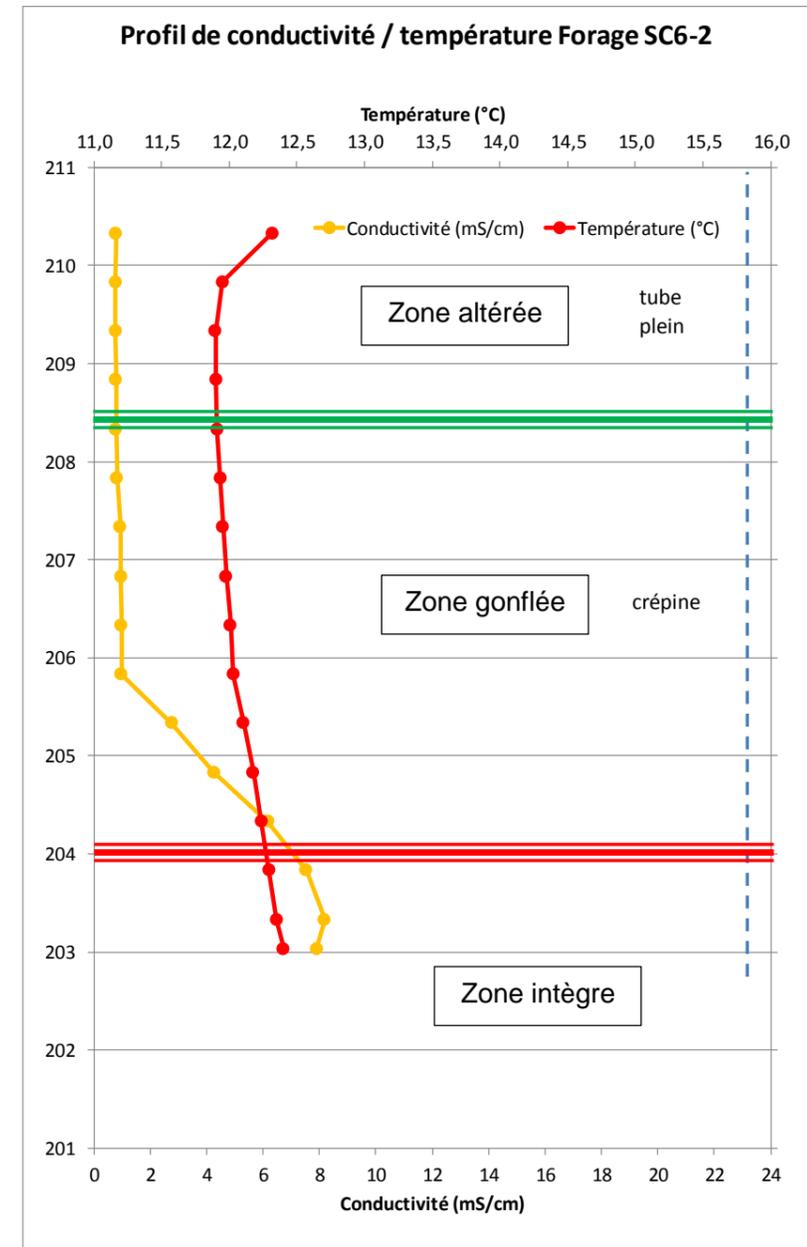
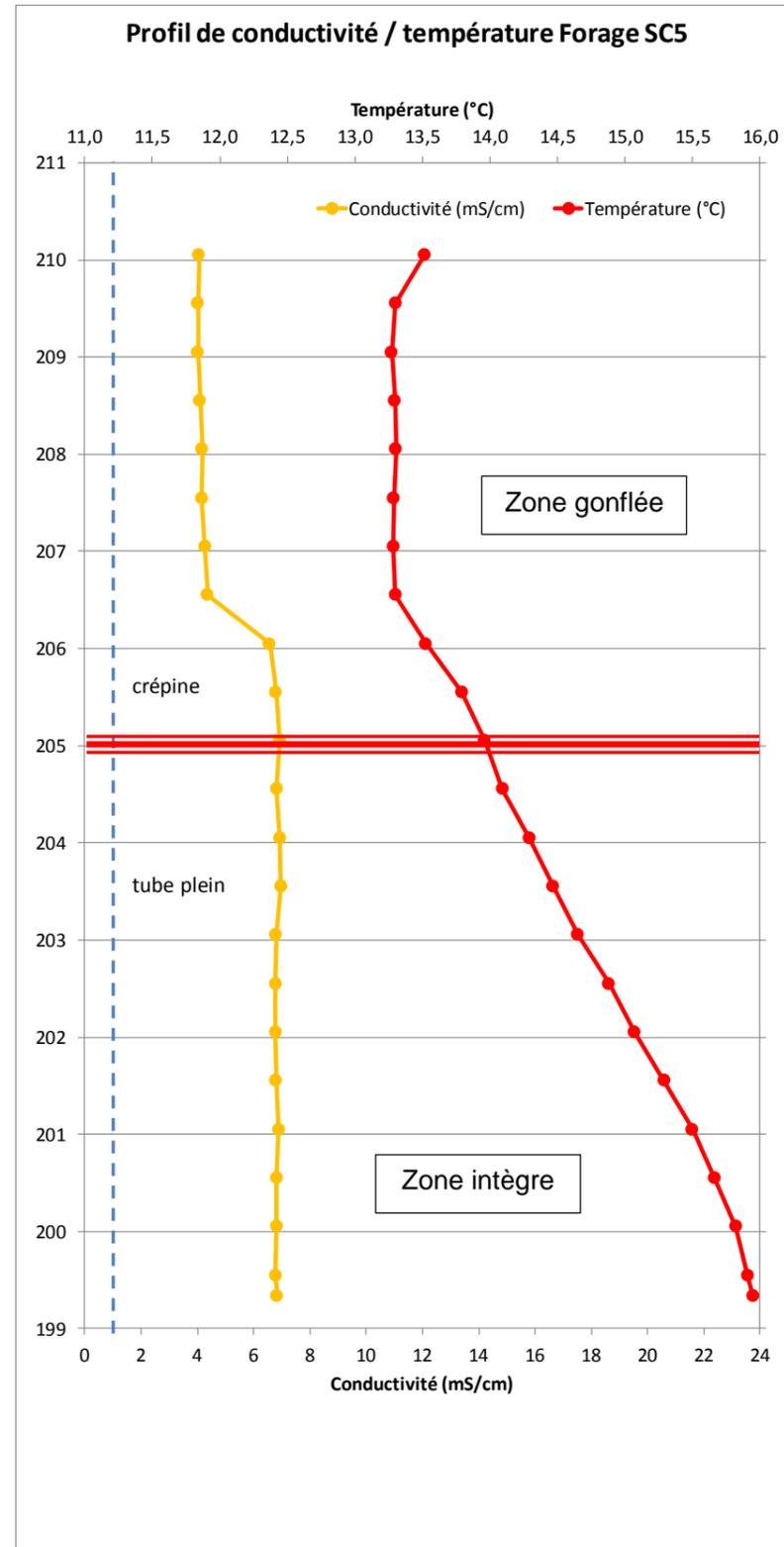
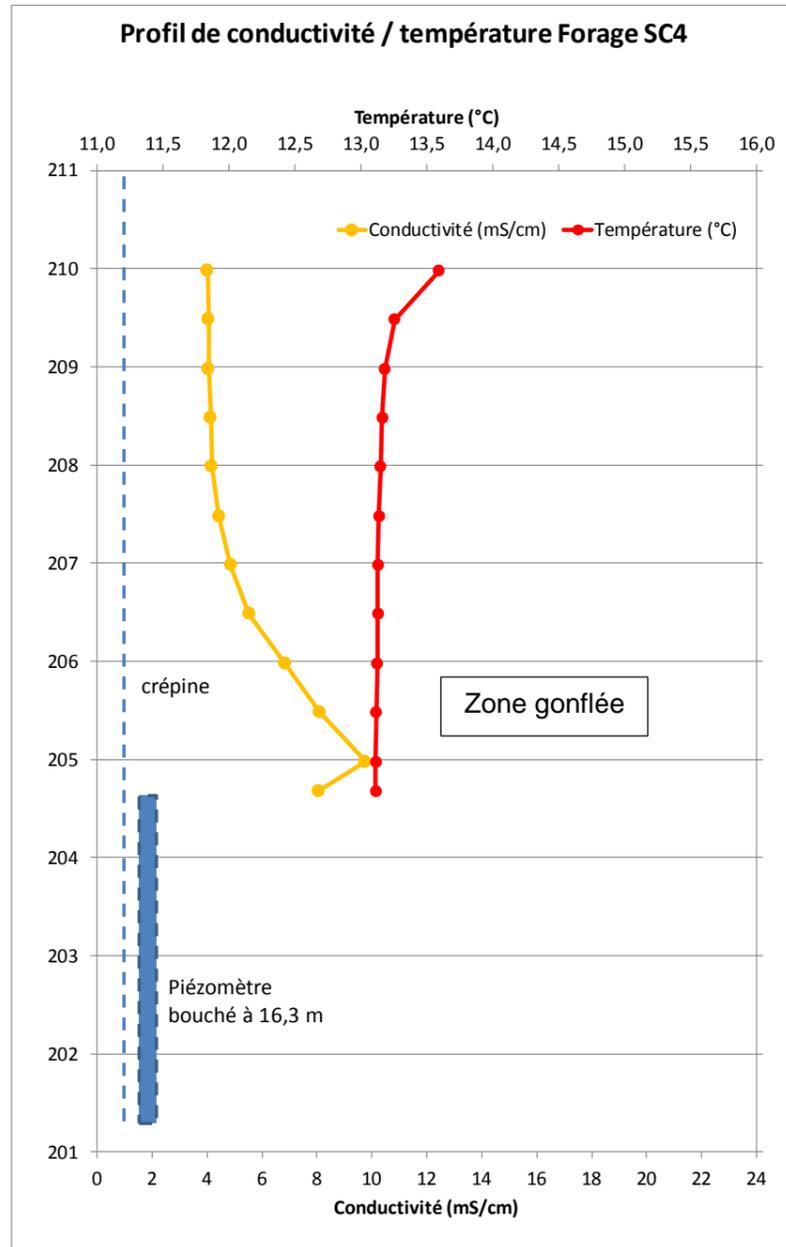


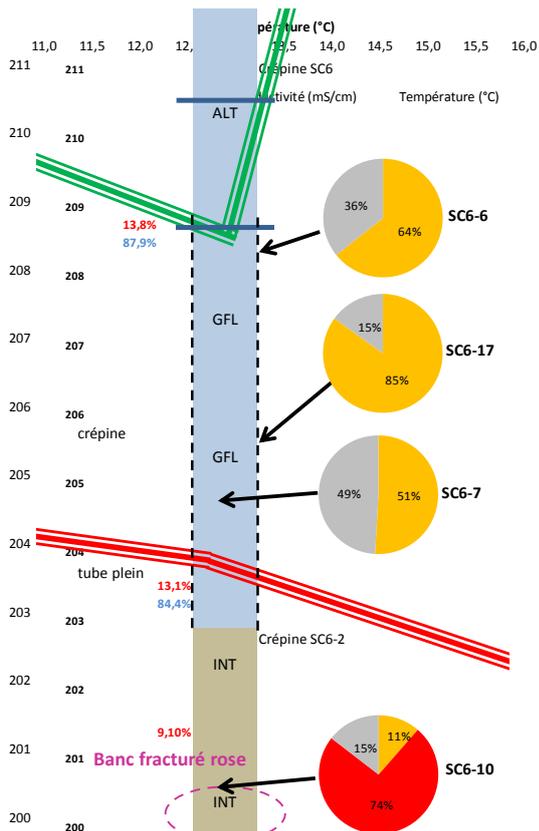
Figure 33 – Profils de conductivité électrique et de température sur les eaux des forages SC4 à SC6-2

La conductivité électrique des eaux du SC7 lentement et régulièrement de la surface de la nappe (environ 223 m NGF) jusqu'à 204 m NGF, passant de 2,36 mS/cm à 3,35 mS/cm, elle augmente plus bas très rapidement jusqu'au fond du forage, jusqu'à atteindre des valeurs caractéristiques d'eaux extrêmement minéralisées (>48 mS/cm). Un phénomène de stratification des eaux par densités, donc par salinités, croissantes, a pu se produire dans la partie inférieure de la crépine, si la conductivité hydraulique est très faible, et que les eaux circulent très lentement et/ou que les eaux souterraines sont absentes. Il serait donc possible d'envisager des vitesses de circulation plus importantes au-dessus de 204 m NGF. Il peut s'agir également d'eaux très minéralisées qui circulent en profondeur. La conductivité électrique du prélèvement d'eau sur SC7 (3,12 mS/cm) conduit à envisager la venue d'eau vers 205-206 m NGF. Cela va bien dans le sens de circulations d'eaux plus aisées dans la partie supérieure de la crépine.

Les mesures réalisées à l'intérieur de la crépine du piézomètre SC6-2 (cf. Figure 34), qui est située en zone gonflée et en partie en zone intègre dans le fond, montrent une température légèrement plus élevée qu'à l'intérieur du SC7. En effet, on mesure 12,32°C en surface de l'eau à 210,2 m NGF, la température diminue ensuite à 11,9°C autour de 209 m NGF, puis remonte continuellement jusqu'à la mesure la plus profonde, située à 203,0 m NGF, jusqu'à atteindre 12,4°C. Les eaux sont globalement plus chaudes de l'ordre de 1°C dans les eaux du forage SC6-2 que dans les eaux du forage SC7. Le gradient de température est beaucoup plus élevé que dans SC7, il atteint 8,3 °C/100 m. Les eaux sont également beaucoup plus conductrices en profondeur. Après avoir stagné autour de 1 mS/cm entre 210 m et 206 m, elles atteignent en fond de forage 8 mS/cm. L'interprétation proposée pour ces mesures est la suivante : les transformations d'anhydrite en gypse sont déjà présentes à 210 m NGF, la température de l'eau étant d'emblée plus élevée que dans SC7, mais elles restent modérées car, dans la zone gonflée, il ne reste quasiment plus d'anhydrite. Plus en profondeur, en approchant de la zone intègre, la température et la conductivité électrique croissantes indiqueraient un degré de transformations plus important, et ceci dans la tranche 203-206 m NGF.

Forage SC4

Profil de conductivité / température Forage SC5



Profil de conductivité / température Forage SC6-2

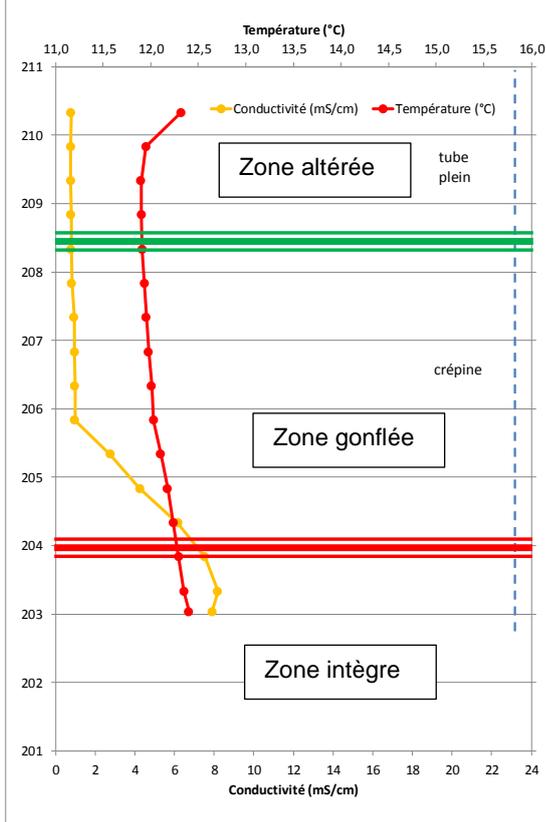
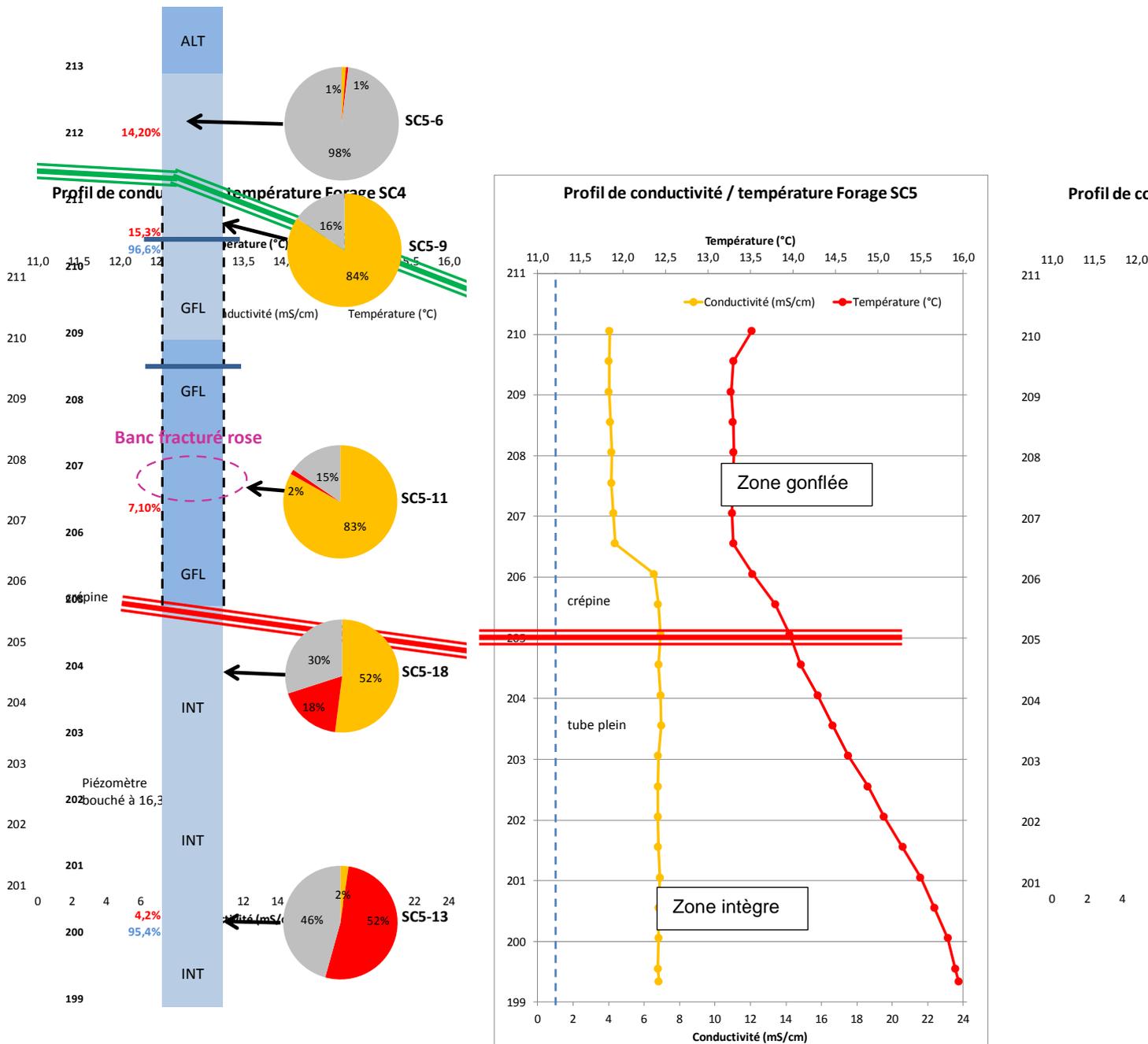


Figure 34 – Comparaison des compositions minéralogiques des carottes analysées (voir Annexe 8 pour la légende) et des températures et conductivités électriques mesurées sur les eaux souterraines - Piézomètre SC6-2

Les mesures effectuées sur les eaux du piézomètre SC5 (Figure 35) montrent que la température des eaux est beaucoup plus élevée que sur SC6-2 et SC7, puisque comprise entre 13,3 et 15,9°C. La crépine est située dans la zone gonflée, et le tube plein sous-jacent dans la zone intègre. La valeur de 15°C est dépassée à partir de 202 m NGF, et continue à croître jusqu'au fond du forage à 199 m NGF. Le gradient thermique global est de 26°C pour 100 m, ce qui est extrêmement élevé. La conductivité augmente avec la profondeur au droit de la crépine, jusqu'à 7 mS/cm environ, ce qui peut traduire l'arrivée d'eaux salées issues du forage géothermique et/ou une intense transformation de l'anhydrite en gypse, puis reste constante autour de cette valeur dans le tube plein qui occupe le fond du forage. Comme supposé à l'examen des analyses minéralogiques, la tranche de terrain 205-210 m NGF apparaît en zone gonflée et toujours en cours de gonflement, et la tranche de terrain située entre 199 m NGF et 205 m NGF, qui est en zone intègre, présente une intensité de gonflement encore supérieure, au vu de l'accroissement de température et de l'anhydrite résiduelle dans l'échantillon SC5-18.



La crépine du forage SC4 capte des eaux situées dans la zone gonflée. La température des eaux est élevée, au regard des températures relevées sur SC7 et SC6-2, mais dans la même gamme que les températures relevées sur SC5, à l'épicentre du gonflement, dans la tranche supérieure de la nappe, c'est-à-dire dans la zone gonflée du SC5. Elles sont comprises entre 13,1 et 13,6°C pour la tranche accessible 205-210 m NGF. La conductivité électrique des eaux augmente progressivement vers le fond. Les températures des eaux sur toute la hauteur crépinée semblent mettre en évidence la présence d'un phénomène d'hydratation de l'anhydrite sur toute la tranche de terrains accessibles aux mesures de température et conductivité. Cette interprétation est cohérente avec les analyses minéralogiques. Les conductivités électriques élevées en fond de forage peuvent traduire, comme pour SC5, la circulation d'eaux chlorurées sodiques issues du forage géothermique ou la dissolution de l'anhydrite avant sa cristallisation en gypse.

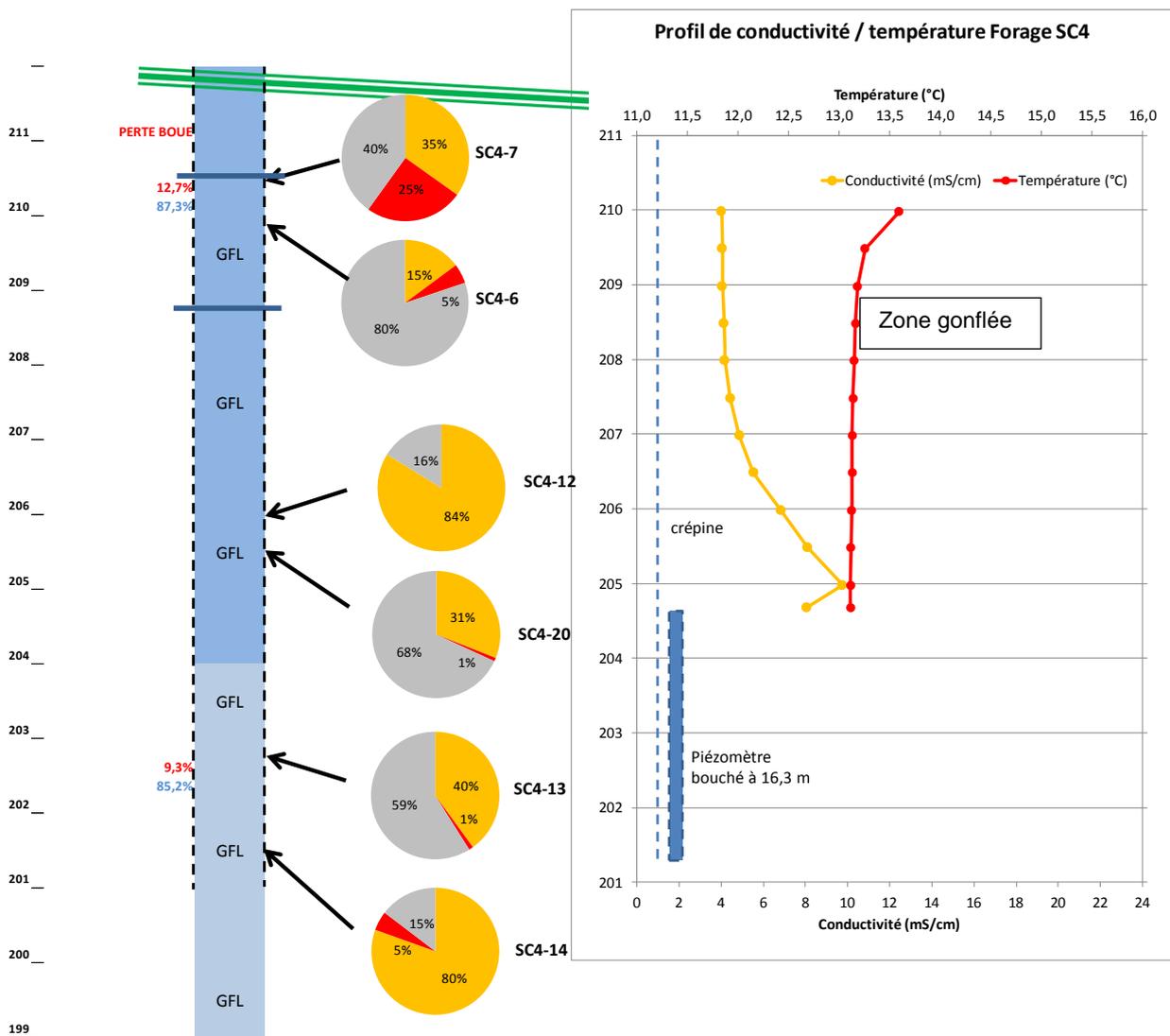


Figure 36 – Comparaison des compositions minéralogiques des carottes analysées (voir Annexe 8 pour la légende) et des températures et conductivités électriques mesurées sur les eaux souterraines - Piézomètre SC4

Les diagraphies des puits Schorr et communal ont été effectuées. Elles ne sont pas présentées ici car elles n'indiquent pas d'anomalies particulières. Le puits Matjeka n'était pas accessible le jour de notre visite.

Les profils de température apparaissent donc à l'usage un excellent moyen pour identifier les zones où les phénomènes exothermiques d'hydratation de l'anhydrite sont actifs. D'une manière générale les mesures thermiques cadrent bien avec l'idée que l'on se fait du schéma d'écoulement dans le système naturel et perturbé par les apports parasites d'eau. Nous pensons que la situation au SC7 est représentative de la situation naturelle du Keuper.

### 7.3.3 Données hydrogéochimiques

#### 7.3.3.1 Conditions de prélèvements

Les prélèvements d'eaux souterraines mentionnés ci-dessus, et réalisés par nos soins, ont tenté de renouveler trois fois le volume d'eau inclus dans chaque ouvrage, à l'intérieur de la crépine mais aussi du massif filtrant. Des difficultés ont été rencontrées : concernant les piézomètres SC4 et SC6-2, les ouvrages ne réalimentaient pas, ce qui occasionnait le dénoisement très rapide de la crépine. Le piézomètre SC4 a été purgé une fois, puis prélevé le lendemain, après remontée de l'eau à son niveau initial. Le piézomètre SC6-2 a été vidé

trois fois, les prélèvements ont été réalisés sur les deuxième et troisième vidanges. Les piézomètres SC5 et SC7 ont très bien réalimenté. Le pompage dans le SC7 a été ajusté pour occasionner un rabattement stabilisé, ce qui a fourni un débit de 8 l/min. Les puits privés contenant un volume d'eau trop conséquent pour être purgé trois fois (temps estimé pour une purge de 4-5 h), un pompage a été réalisé pendant 40-50 minutes, en vue de renouveler l'eau en partie. Un suivi de la conductivité électrique des eaux a été effectué en continu.

Le ruisseau Dachsgaben a été prélevé au niveau du pont situé à l'ouest de la maison Schorr.

Les fiches de prélèvements, qui contiennent tous les détails des opérations, sont fournies en annexe 9.

Les échantillons d'eaux souterraines ont été confiés à deux laboratoires :

- Laboratoire EUROFINS de Saverne pour les analyses des anions, des cations, du pH, de la conductivité, et du tritium ;
- Plateforme CONDATE OSUR à Rennes pour les analyses de datation sur les CFC (chlorofluorocarbones) et le SF6 (hexafluorure de soufre).

### 7.3.3.2 Résultats des analyses chimiques

Les bordereaux du laboratoire Eurofins sont fournis en Annexe 10. Ils sont synthétisés dans le tableau fourni en page suivante.

La balance ionique a été calculée par nos soins, à l'aide du logiciel *Diagrammes* de l'Université d'Avignon. Cela consiste à vérifier que la somme des cations est égale à celle des anions, pour les ions majeurs : calcium, magnésium, sodium et potassium pour les cations ; chlorures, sulfates, nitrates et bicarbonates pour les anions. On admet qu'une différence peut exister entre la somme des anions et celle des cations, mais elle ne doit pas excéder une erreur acceptable de 5% (sommées exprimées en milliequivalent par litre).

Le tableau ci-dessous récapitule les balances ioniques calculées pour les eaux analysées. Hormis pour le piézomètre SC6-2 qui présente une balance ionique de 7%, sortant légèrement de la gamme de l'acceptable, toutes les autres valeurs sont convenables.

Ouvrages prélevés	Balance ionique calculée
SC4	2%
SC5	0%
SC6-2	7%
SC7	1%
Puits Schorr	2%
Puits Matjeka	- 1%
Puits communal	1%
Ruisseau Dachsgaben	3%

Tableau 4 – Balances ioniques calculées pour les analyses d'eaux réalisées par Eurofins

Référence EUOFINS : 15E075001-001 15E075001-002 15E075001-003 15E075001-004 15E075001-005 15E075001-006 15E075001-007 15E075001-008											
Référence Client : SC4 SC5 SC6-2 SC7 Puits communal Puits Schorr Puits Matjeka Ruisseau											
Tests	Paramètres	Unités	LQ								
Mesure du pH	pH			7,2	7,3	7,4	7,2	7,3	7,1	7,5	8
	Température de mesure du pH	°C		18	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9
Conductivité à 25°C	Conductivité corrigée automatiquement à 25°C	µS/cm		7610	4170	2260	3210	1410	1940	1240	1950
	Température de mesure de la conductivité	°C		18,1	18,1	18	18	18,1	18,1	18,1	18,1
Titre Alcalimétrique (TA)	Titre Alcalimétrique simple (TA)	°F	2	<2.00	<2.00	<2.00	<2.00	<2.00	<2.00	<2.00	<2.00
Titre Alcalimétrique Complet (TAC)	Titre Alcalimétrique complet (TAC)	°F	2	29,4	31,5	37,4	26,1	38,8	33,1	25,6	36,5
Carbonates (CO3)	Carbonates	mg CO3/l		<24.0	<24.0	<24.0	<24.0	<24.0	<24.0	<24.0	<24.0
Hydrogénocarbonates (HCO3)	Hydrogénocarbonates	mg HCO3/l		310	336	408	270	424	356	263	396
Dureté Totale (TH)	Titre hydrotimétrique (TH)	°F	0,5	260,8	230,6	130,4	250,6	90,2	115,4	55,2	140,4
Nitrates - Spectrophotométrie UV-Vis	Nitrates	mg NO3/l	1	<1.00	22,7	10,7	56,3	54,3	10,5	42,5	20,8
	Azote nitrique	mg N-NO3/l	0,2	<0.20	5,14	2,41	12,7	12,25	2,38	9,61	4,7
Nitrites - Spectrophotométrie UV-Vis	Nitrites	mg NO2/l	0,04	0,14	<0.04	0,06	0,35	<0.04	<0.04	<0.04	0,09
	Azote nitreux	mg N-NO2/l	0,01	0,04	<0.01	0,02	0,11	<0.01	<0.01	<0.01	0,03
Chlorures - Spectrophotométrie UV-Vis	Chlorures (Cl)	mg/l	1	999	266	65,3	62,7	132	24,2	176	26,9
Sulfates (SO4) Spectrophotométrie UV-Vis	Sulfates	mg SO4/l	5	2580	2000	923	1840	126	808	51,4	816
Orthophosphates (PO4) - Spectrophotométrie UV-Vis	Orthophosphates	mg PO4/l	0,1	0,12	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	0,81	0,1
Bromures	Bromures (Br)	mg Br/l	0,5	3,4	<2.00	<1.00	<2.00	<0.50	<1.00	<0.50	<1.00
Fluorures	Fluorures	mg/l	0,5	<0.5	<0.5	0,64	0,51	0,56	0,69	0,82	<0.5
Aluminium (Al)	Aluminium	mg/l	0,05	0,94	0,41	2,45	0,23	<0.05	<0.05	<0.05	0,13
Calcium (Ca)	Calcium	mg/l	1	526	512	327	503	128	323	80,7	313
Fer (Fe)	Fer	mg/l	0,01	0,89	0,22	1,83	0,11	<0.01	0,12	0,03	0,2
Magnésium (Mg)	Magnésium (Mg)	mg/l	0,01	244	206	139	232	78,8	88,4	35,4	114
Potassium (K)	Potassium	mg/l	0,1	42,2	22,8	8,93	11,3	51,8	28,4	108	6,84
Silicium (Si)	Silicium	mg/l	0,02	5,83	4,74	7,75	4,47	4,81	3,86	3,65	4,44
Sodium (Na)	Sodium (Na)	mg/l	0,05	984	293	80,1	49,2	22,7	12,8	27,6	13
Strontium (Sr)	Strontium	mg/l	0,005	10,6	13,9	40,3	11,6	1,73	12,1	3,99	7,14
Manganèse (Mn)	Manganèse	µg/l	0,5	405	28,4	303	57,6	<0.50	291	0,68	134
Silice (SiO2) (Dosage du Silicium nécessaire)	Silice (SiO2)	mg/l		12,5	10,2	16,6	9,57	10,3	8,27	7,81	9,51
Activité en Tritium	Activité en Tritium	Bq/l		< 6	< 6	< 6	< 6	< 6	< 6	< 6	< 7

**Tableau 5 – Résultats des analyses chimiques et des analyses en tritium sur les eaux souterraines et le Dachsgaben**

### 7.3.3.3 Interprétation des analyses d'eaux souterraines

Ces résultats indiquent tout d'abord que la conductivité électrique des eaux des piézomètres se trouve très supérieure (2260 à 7610  $\mu\text{S/cm}$ ) à celle des puits privés (1240 à 1950  $\mu\text{S/cm}$ ), même si cette dernière se trouve dans une gamme assez élevée pour des eaux circulant à faible profondeur. Les puits privés captent l'eau présente dans la zone altérée du Keuper, et non une nappe alluviale, ceci explique cette minéralisation.

Au droit du lotissement, la conductivité électrique des eaux du forage SC4 est très supérieure à celle des autres forages (SC4 : 7610  $\mu\text{S/cm}$ , SC5 : 4170  $\mu\text{S/cm}$ , SC6 : 2260  $\mu\text{S/cm}$ , SC7 : 3210  $\mu\text{S/cm}$ ), lui conférant ainsi une particularité, qui sera également mise en évidence sur les analyses chimiques.

Le pH des eaux est globalement proche de la neutralité (7,2 à 7,4 sur les forages, 7,1 à 7,5 sur les puits privés).

Le diagramme de Schoeller-Berkaloff (Figure 37) représente chaque analyse par une ligne brisée, profil caractéristique de la concentration de chaque ion majeur en solution dans l'eau, les six échelles logarithmiques à égale distance les unes des autres, étant décalées de façon à aligner les valeurs unitaires des milliéquivalents des différents anions et cations. Les profils obtenus permettent de mettre en évidence la parenté des eaux entre elles.

Celui construit sur les analyses chimiques des eaux de Lochwiller (Figure 37) met bien en évidence la nature très sulfatée, calcique, magnésienne des eaux des piézomètres en place sur le lotissement. La richesse des eaux en sulfates et en calcium provient du contact avec l'anhydrite et le gypse, ces minéraux sont solubles et en cours de transformations minéralogiques. Le piézomètre SC4 présente les concentrations les plus élevées en calcium (526 mg/l), magnésium (244 mg/l), sodium (984 mg/l), potassium (42,2 mg/l), chlorures (999 mg/l) et sulfates (2580 mg/l), ce qui l'individualise particulièrement sur le graphique. Sa teneur en nitrates (<1 mg/l), très faible au regard de celles des autres ouvrages (jusqu'à 56,3 mg/l en SC7), l'individualise également, et semble mettre en évidence l'origine plutôt souterraine des eaux, au regard d'une composante plus superficielle des autres eaux souterraines analysées. Les nitrates ont en effet pour origine les engrais utilisés en agriculture.

Les eaux du forage SC5 présentent le même faciès que celles du forage SC4, toutefois plus dilué, notamment en sodium (293 mg/l) et potassium (22,8 mg/l), en chlorures (266 mg/l) et en sulfates (2000 mg/l). Les eaux des forages SC6-2 et SC7 apparaissent dans les mêmes gammes de concentrations en calcium et magnésium, mais dans des gammes moins concentrées en sodium et potassium, et en chlorures. Les eaux du forage SC6 contiennent moins de calcium (327 mg/l) et de sulfates (923 mg/l) que celles de SC7 (503 mg/l et 1840 mg/l respectivement), probablement du fait d'un apport d'eaux moins minéralisées issues du pied de versant (secteur du puits communal) et de la « jeunesse » relative de l'aquifère au regard du retard du début de gonflement.

De ces observations, il ressort que les eaux des quatre forages sont riches en sulfates et en calcium, issus de la dissolution des évaporites. Le forage SC4 et dans une moindre mesure SC5, présentent une composante supplémentaire chlorurée, sodique et potassique. Pour les chlorures et le sodium, il semble qu'ils proviennent d'un mélange avec des eaux plus profondes, remontées du Muschelkalk via le forage géothermique fuyard supposé. Toutefois, il est étonnant que les analyses réalisées par le BRGM en 2008 sur les eaux d'inondation de la propriété Schorr, et les analyses réalisées par le cabinet PLUME en 2013 [26] sur le PZ1 (distant de quelques mètres du SC4) ne mettent pas en évidence la présence aussi importante de chlorure de sodium. Nous ne voyons pas d'explication à cette constatation. La

salinité du Muschelkalk demanderait à être vérifiée. Si l'on considère le chlorure et le sodium comme traceurs de l'eau du forage géothermique, on est conduit à admettre que les eaux du forage SC5 sont mélangées à des eaux provenant du Muschelkalk dans une proportion de 20 à 25% et que les eaux du SC6 n'en contiennent pas. Ceci peut s'interpréter par le fait que le secteur du SC6, trop éloigné, n'a jamais été atteint par les eaux du forage géothermique, ce qui implique que l'eau provoquant le gonflement en ce lieu a une autre origine : eaux souterraines issues de l'amont hydrogéologique (secteur SC7), ou une infiltration de la pluie accrue à la faveur des terrains déstructurés par les mouvements voisins intenses, ou encore les canalisations rompues.

Les teneurs en potassium sont plus difficiles à interpréter, cet élément étant largement présent dans les engrais et pouvant en conséquence être apporté par les eaux superficielles qui se sont infiltrées au droit de champs ou de jardins potagers amendés.

Les eaux du puits Schorr sont celles qui se rapprochent le plus des eaux des piézomètres, du point de vue du calcium (323 mg/l), du magnésium (88 mg/l), et des sulfates (808 mg/l). Cela indique un mélange avec des eaux issues de l'aquifère développé au droit de la colline, comme cela avait été mis en évidence dans l'expertise de Plume, réalisée dans le cadre de l'expertise judiciaire [26]. Cette observation corrobore également l'esquisse piézométrique proposée au § 7.3.1.1 (Figure 30). L'influence chlorurée et sodique du forage géothermique ne semble pas se faire sentir au niveau du puits Schorr (24 mg/l et 13 mg/l respectivement), alors qu'elle se fait sentir sur le forage SC5 qui est situé à peu près à la même distance, et vers l'amont hydrogéologique. Les eaux cheminent peut-être plutôt en direction du puits Matjeka (176 mg/l et 28 mg/l respectivement) et du puits communal (132 mg/l et 23 mg/l respectivement).

## Lochwiller

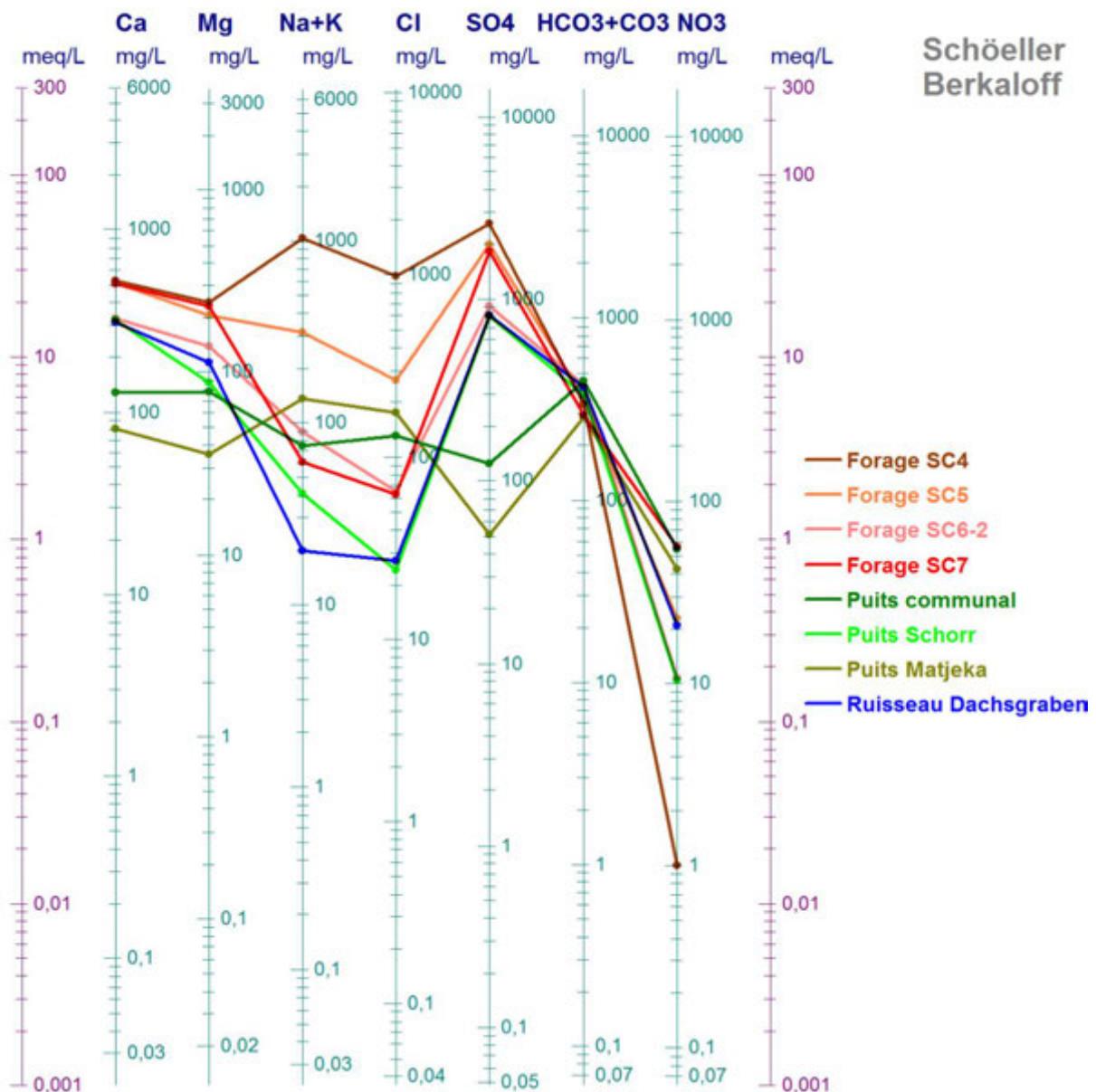


Figure 37 – Diagramme de Schoeller-Berkaloff

Enfin, un second diagramme est proposé, le diagramme de Stiff, qui permet d'obtenir une figure géométrique polygonale caractéristique d'une famille d'eau donnée. Les concentrations des ions majeurs sont reportées sur des axes horizontaux de part et d'autre de l'axe vertical d'origine. Les cations sont représentés à gauche et les anions à droite. Ce diagramme produit des représentations individuelles de faciès chimiques.

Ce diagramme construit sur les analyses chimiques des eaux de Lochwiller, très visuel, montre clairement la minéralisation importante des eaux pompées dans le forage SC4, et notamment leur composante sodique, potassique, sulfatée, chlorurée, calcique et magnésienne. Les eaux des forages SC5 et SC7 indiquent le même type de faciès que les eaux de SC4, sans la composante sodique et chlorurée, comme vu auparavant. Les concentrations sont globalement plus faibles, ce qui apparaît encore davantage sur les eaux de SC6-2. Les eaux des puits privés sont nettement moins concentrées, sauf celles du puits Schorr, dont la composante sulfatée, calcique et magnésienne est confirmée.

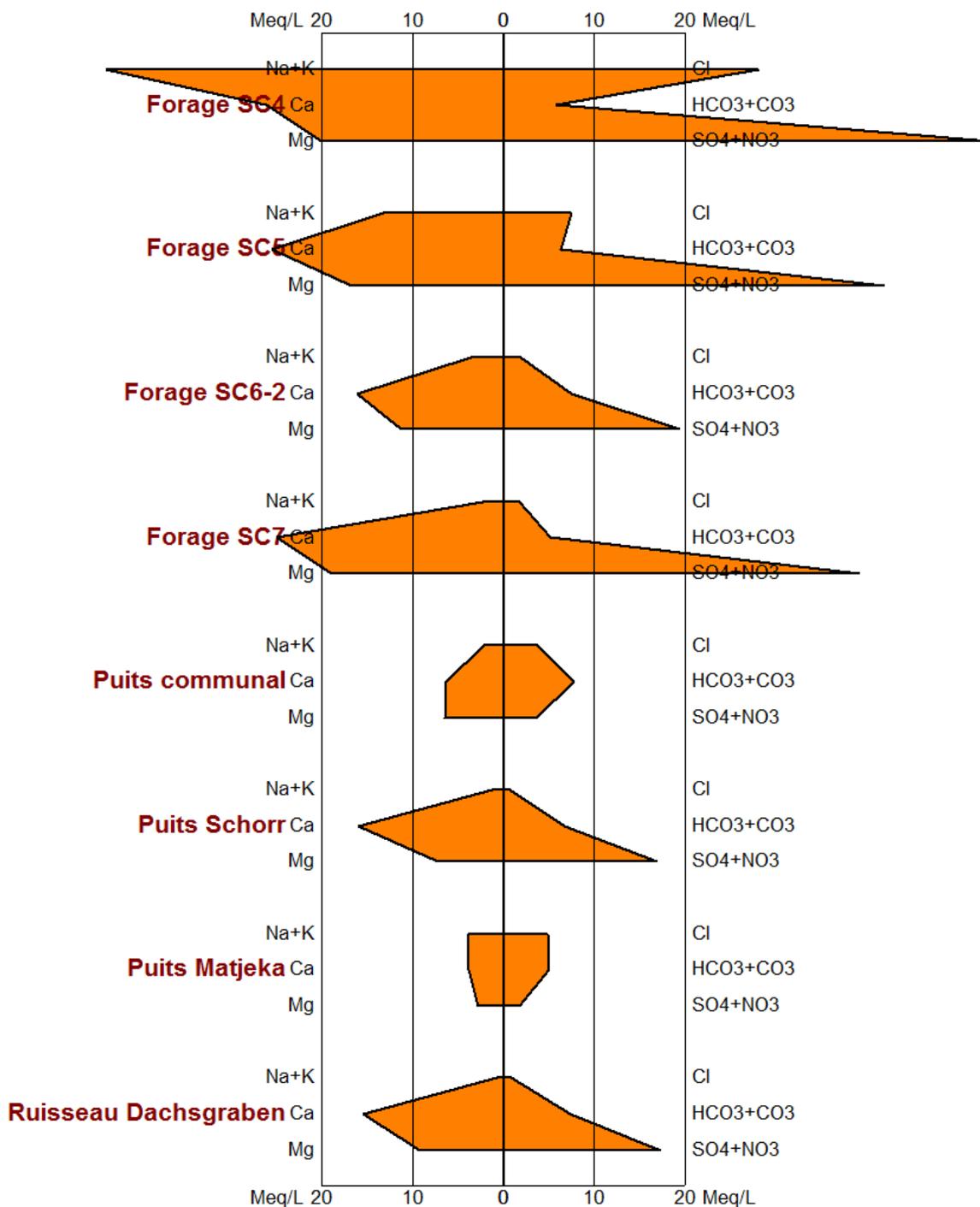


Figure 38 – Diagramme de Stiff

En dehors des ions majeurs, on notera une composante particulière en manganèse des eaux du forage SC4 (405 µg/l) et du forage SC6-2 (303 µg/l), alors que les eaux des autres forages en sont beaucoup plus pauvres (SC5 : 28,4 µg/l et SC7 : 57,6 µg/l). Les eaux du puits Schorr sont également relativement riches en manganèse (291 µg/l), au regard des concentrations de ce minéral dans le puits communal (<0,50 µg/l) et dans le puits Matjeka (0,68 µg/l). Cela confirme une fois de plus que le puits Schorr contient un mélange d'eaux du Keuper altéré du bas du village et du Keuper en cours de gonflement au droit du lotissement, par ailleurs enrichi, selon nous, en eaux souterraines profondes issues du forage géothermique captant le Muschelkalk.

Les eaux du ruisseau Dachsgaben, qui s'écoule dans le village, présentent un faciès très proche de celui du puits Schorr, c'est-à-dire intermédiaire entre les eaux souterraines du lotissement où le gonflement est en cours et génère une composante sulfatée-calcique et magnésienne, et les eaux souterraines du Keuper altéré, faciès représenté par les eaux du puits communal et du puits Matjeka. Ce ruisseau écoulait donc des eaux apportées par le Keuper altéré traversé en amont, avec une composante d'eaux de Keuper « intègre » contenant du calcium, et une quantité non négligeable de sulfates. On peut supposer que des phénomènes de dissolution de gypse sont en cours en amont de Lochwiller.

### 7.3.3.4 Etat de saturation des eaux vis-à-vis du gypse et de l'anhydrite

Le logiciel *Diagrammes*, déjà cité, fait appel au logiciel *Phreeqc* pour le calcul des indices de saturation des eaux vis-à-vis de différents minéraux.

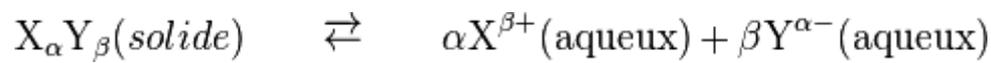
L'indice de saturation se calcule comme suit :

$$IS = \log(Qs / Ks)$$

avec :

- Qs = le produit des concentrations des ions constitutifs du minéral en milieu aqueux (en mol/l),
- Ks = le produit de solubilité du minéral, calculé de la façon suivante, à l'équilibre chimique :

si la dissolution du minéral est décrite par la réaction suivante :



Le produit de solubilité est :

$$K_s = [X^{\beta+}]^{\alpha} \cdot [Y^{\alpha-}]^{\beta}$$

L'indice de saturation s'interprète comme suit :

- si IS = 0, les eaux et les phases minérales solides sont à l'équilibre chimique, il n'y a ni dissolution, ni cristallisation ;
- si IS > 0, les eaux sont sursaturées vis-à-vis du minéral, qui aura tendance à cristalliser ;
- si IS < 0, les eaux sont sous-saturées vis-à-vis du minéral, qui aura tendance à s'y dissoudre.

Les résultats des calculs pour les eaux souterraines prélevées à Lochwiller indiquent les résultats suivants :

	<i>Anhydrite</i>	<i>Gypse</i>	<i>Calcite</i>	<i>Dolomite</i>	<i>Quartz</i>	<i>Halite</i>
<b>Forage SC4</b>	-0,3	-0,06	0,34	0,6	0,42	-4,72
<b>Forage SC5</b>	-0,32	-0,08	0,53	0,92	0,33	-5,79
<b>Forage SC6-2</b>	-0,67	-0,43	0,63	1,15	0,53	-6,92
<b>Forage SC7</b>	-0,34	-0,1	0,36	0,63	0,3	-7,18
<b>Puits communal</b>	-1,69	-1,45	0,34	0,73	0,32	-7,12
<b>Puits Schorr</b>	-0,68	-0,44	0,32	0,34	0,23	-8,14
<b>Puits Matjeka</b>	-2,16	-1,92	0,19	0,28	0,2	-6,9
<b>Dachsgraben</b>	-0,7	-0,46	1,23	2,27	0,29	-8,09

**Tableau 6 – Indices de saturation calculés pour les eaux souterraines de Lochwiller vis-à-vis de différents minéraux**

Ces résultats mettent en évidence que les eaux sont sous-saturées vis-à-vis de l'anhydrite. Cela paraît normal car ce minéral est instable et tend à se dissoudre pour re-précipiter en gypse. Le gypse est plus proche de la saturation que l'anhydrite sur l'ensemble des piézomètres. L'indice de saturation des eaux vis-à-vis du gypse est du même ordre de grandeur dans le forage SC4 et dans le forage SC7, alors que les eaux sont moins concentrées dans ce dernier. Cela s'explique par la présence de chlorure de sodium dans le forage SC4, qui favorise la solubilité du gypse. Il est probable que cet état de légère sous-saturation des solutions en circulation dans le sous-sol soit celui d'eaux circulant le plus facilement dans le sous-sol, à la faveur des fractures, ou des bancs disjoints. Il est donc possible que les eaux peu minéralisées issues des infiltrations des eaux météoriques et des eaux profondes provenant du forage géothermique fuyard diluent les eaux présentes au contact du gypse et de l'anhydrite, plus riches en sulfates et en calcium, les faisant passer à un état sous-saturé. L'apparition d'un gonflement au droit du lotissement, issu de la précipitation du gypse, témoigne du fait que certaines eaux, certainement moins mobiles que les eaux que nous avons pu prélever lors des pompages à l'intérieur des ouvrages, sont sursaturées vis-à-vis de ce minéral. Il s'agit très probablement d'eaux interstitielles, contenues dans la porosité des bancs d'argilites et d'anhydrite.

Concernant les autres minéraux, les eaux de Lochwiller sont toutes sursaturées vis-à-vis de la calcite, de la dolomite et du quartz, ce qui signifie qu'elles contiennent des teneurs en calcium, carbonates/bicarbonates, magnésium, et silice suffisamment élevées pour que ces minéraux aient tendance à précipiter au sein du milieu souterrain. Les eaux sont en revanche sous-saturées vis-à-vis de la halite, qui est, rappelons-le, constituée de chlorure de sodium.

### **7.3.4 Données de datation des eaux**

#### **7.3.4.1 Méthodes utilisées**

##### **- Le tritium**

Il s'agit d'un isotope radioactif de l'hydrogène, qui est considéré comme un élément dateur des eaux souterraines, car il se désintègre (demi-vie de 12,32 ans). Il permet d'estimer le temps de séjour moyen des eaux d'un aquifère. Produit naturellement dans l'atmosphère, les teneurs dans les précipitations ont tout d'abord augmenté, suite aux essais thermonucléaires aériens de 1952 à 1963, pour ensuite diminuer et se stabiliser à une teneur supérieure à la teneur naturelle de 5 UT (Figure 40). Actuellement, la teneur moyenne se situe à un niveau très faible, entre 10 et 30 UT, soit entre 1,18 Bq/l et 3,54 Bq/l.

Grâce au suivi des teneurs en <sup>3</sup>H des précipitations, il est possible de déterminer le temps de séjour moyen des eaux souterraines d'un aquifère à l'aide de modèles mathématiques qui, à partir d'un signal d'entrée (teneurs en <sup>3</sup>H dans les précipitations) et d'un signal de sortie

(teneurs en  $^3\text{H}$  dans les eaux souterraines d'un aquifère), calculent le meilleur ajustement possible entre les sorties calculées et les valeurs mesurées. De cet ajustement, on en déduit le temps de séjour moyen.

Ces études isotopiques utilisent classiquement trois types de modèles suivant la façon dont les eaux se mélangent en traversant un milieu poreux : le modèle mélange, le modèle piston appelé encore exponentiel, ou à recharge continue et le modèle dispersif. Cet ensemble de modèles peut être généralisé en différenciant temps de séjour moyen et âge d'une molécule d'eau.

1. Ou bien la pluie efficace se mélange complètement à l'eau de l'aquifère et la teneur en  $^3\text{H}$  à la sortie du système est identique à celle répartie uniformément dans tout l'aquifère : le modèle est de type mélange ou exponentiel, ou encore à recharge continue. Ceci implique que toute section du réservoir contient, dans les mêmes proportions, des molécules d'eau de tous les âges et que les eaux à l'exutoire sont représentatives de celles de l'aquifère.
2. Ou bien la pluie efficace traverse l'aquifère à vitesse constante comme un écoulement d'eau dans un tuyau et toutes les molécules d'eau ont le même temps de séjour : le modèle est de type piston.
3. Compte tenu de l'hétérogénéité du milieu entraînant des différences de vitesses entre les pores et entre plusieurs couches de l'aquifère, il peut résulter une dispersion du signal tritié de la pluie par rapport à la direction principale de l'écoulement. Plus la dispersion augmente et plus le signal de sortie tend vers celui du modèle de mélange parfait. Inversement, si la dispersion diminue le signal se rapproche du modèle piston. Les modèles mélange et piston constituent donc les cas limites du modèle dispersif, ou binaire.

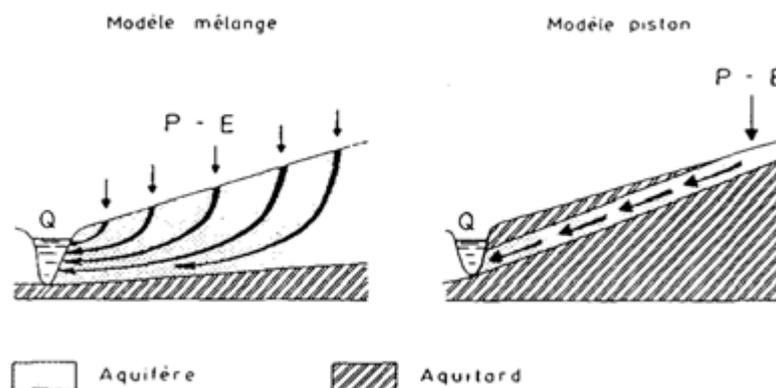


Figure 39 – Représentation schématique des écoulements souterrains de types mélange (= exponentiel, = à recharge continue) et piston [27]

#### - Les gaz dissous

Les chlorofluorocarbones (CFC) et l'hexafluorure de soufre ( $\text{SF}_6$ )<sup>10</sup> sont des gaz anthropiques dont la production n'a commencé qu'au milieu du XX<sup>ème</sup> siècle. Toute trace de ces gaz dans une nappe souterraine indique donc la présence d'une eau de moins de 50 ans, dans laquelle ils sont dissous.

<sup>10</sup> CFC : Chlorofluorocarbones plus connus sous leur nom commercial : Fréons. Gaz anthropiques servant de gaz propulseurs, réfrigérants ou solvants également gaz à effet de serre et destructeur de la couche d'ozone (interdits par le protocole de Montréal).

$\text{SF}_6$  : Hexafluorure de soufre. Gaz isolant utilisé en industrie.

La datation des eaux par les CFC et le SF6 a été rendue possible par la connaissance de :

- leurs concentrations atmosphériques sur les 50 dernières années par le suivi de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) et les reconstitutions historiques à partir des données fournies par les industriels sur les ventes (concentrations identiques en tout point d'un même hémisphère) (Figure 40) ;
- leurs caractéristiques chimiques et en particulier leur solubilité dans l'eau ;
- l'existence de techniques analytiques permettant la détection et la quantification de ces gaz dans l'eau à de très faibles concentrations.

Les CFC permettent non seulement de dater les eaux de manière qualitative (l'eau s'est-elle rechargée avant 1950 ou après) mais aussi quantitative sur les 50 dernières années.

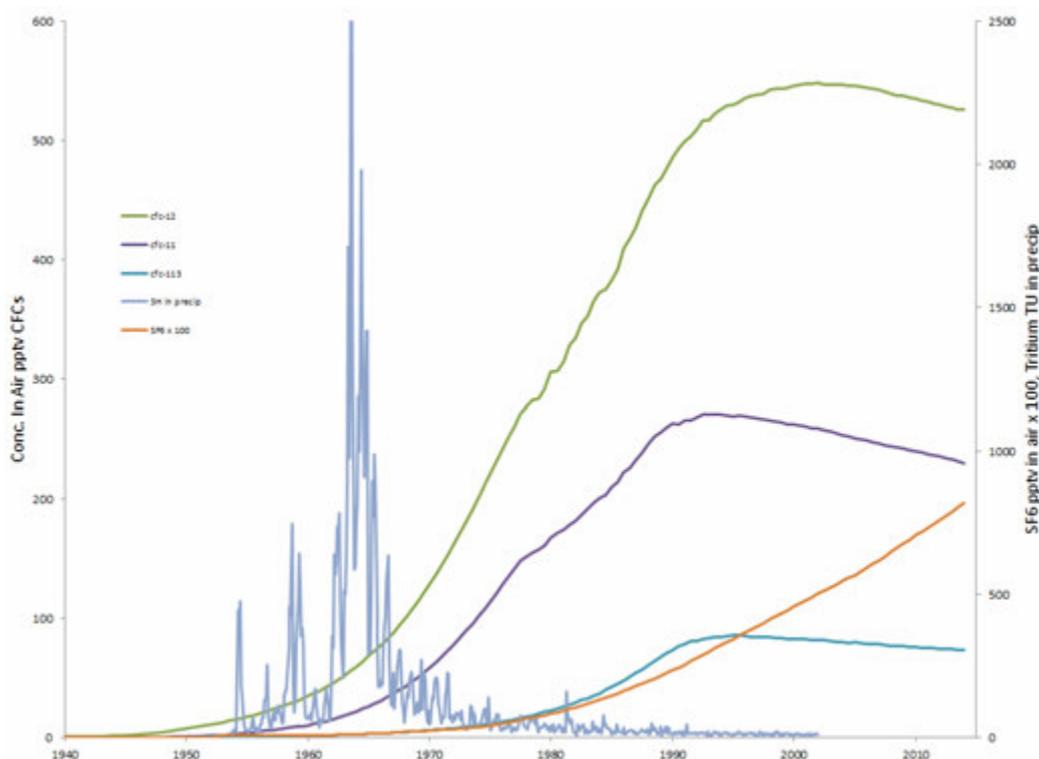


Figure 40 – Evolution dans le temps, depuis 1940, des concentrations en tritium, CFC et SF6 dans l'atmosphère terrestre

### 7.3.4.2 Résultats des analyses

Le tritium a été analysé par le laboratoire Eurofins, à des fins de datation de l'infiltration des eaux présentes dans le sous-sol. Malheureusement les teneurs sont toutes inférieures à la limite de quantification du laboratoire, qui est de 6 Bq/l (cf. Tableau 5 page 58 et Annexe 10).

Les analyses des CFC et SF6 dissous dans les eaux ont été réalisées par la plateforme CONDATE Eau de l'Observatoire des Sciences de l'Univers (OSUR) de Rennes (cf. Annexe 11).

- Piézomètres

L'analyse sur les eaux de SC4 donne des résultats plutôt caractéristiques d'un mélange d'eaux anciennes (30-40 ans, selon teneurs en CFC) (issues du forage géothermique ?) et d'eaux plus récentes (la teneur en SF6 indique une concentration caractéristique de 2010).

Les analyses effectuées sur les eaux du forage SC5 fournissent des âges non cohérents, autour de 35-40 ans, mais avec du CFC12 en excès. Il s'agirait selon le laboratoire d'un mélange complexe d'eaux d'âges différents.

Sur les eaux du forage SC6-2, les âges obtenus sont d'environ 35 ans, si l'on considère un modèle piston. S'il s'agit d'un mélange binaire, ce qui est plus probable, le laboratoire l'interprète comme un mélange de 20-40% d'eau récente, avec une eau de 40-45 ans. Cette dernière pourrait être issue du forage géothermique, toutefois les analyses chimiques n'indiquent pas un faciès à tendance chlorurée-sodique comme sur les eaux de SC4, ou plutôt des circulations lentes issues de l'infiltration plus haut sur la colline, qui se produisent au sein du Keuper (secteur SC7 et plus haut). Cela est confirmé par les résultats sur les eaux du piézomètre SC7, qui indiquent des eaux plus anciennes que les précédentes, 40-45 ans pour un modèle piston, >200 ans pour un modèle à recharge continue, et dans le cas d'un modèle binaire, il s'agirait d'une eau de 40 ans ou plus mélangée 10-20% d'eau récente.

- Puits privés

Les résultats sur le puits Schorr indiquent un âge d'environ 40 ans, sauf pour le SF6 qui indique une infiltration vers 2005. Il s'agirait selon le laboratoire d'un mélange complexe d'eaux d'âge différent.

Les analyses effectuées sur les eaux du puits communal ne sont pas interprétables : le SF6 indique une infiltration autour de 2013, le CFC-113 autour de 1977, et les deux autres sont en excès.

Les eaux du puits Matjeka n'ont pas été analysées.

## 7.4 Analyses géotechniques

Le rapport de GeoRessources placé en Annexe 12 fournit le détail des analyses géotechniques réalisées :

- $\rho_h$ ,  $\rho_d$  et  $\rho_s$  : masses volumiques « naturelle », sèche et des grains ;
- $W$  : teneur en eau « naturelle » ;
- $n$  : porosité calculée ;
- $S_r$  : degré de saturation ;
- Limites d'Atterberg :  $W_L$  : limite de liquidité,  $W_p$  : limite de plasticité,  $I_p$  : indice de plasticité,  $I_c$  : indice de consistance ;
- V.B.S. : valeur au bleu de méthylène.

### 7.4.1 Limites d'Atterberg et valeurs de bleu de méthylène

#### 7.4.1.1 Principes

On distingue trois états possibles pour un sol à teneur en eau croissante, les états solide, plastique, et liquide. Pour fixer des critères de détermination entre ces différents états d'un même sol, on utilise les limites d'Atterberg qui sont des grandeurs semi-empiriques dont la détermination est fixée d'une manière normative. Pour préciser les états, on observe à teneur en eau croissante (Figure 41) :

- un état solide sans retrait : le sol est très peu déformable et son volume est indépendant de la teneur en eau si celle-ci reste inférieure à la limite de retrait  $W_R$ ,

- un état solide avec retrait : le sol est très peu déformable et son volume change avec la teneur en eau si celle-ci varie entre la limite de retrait et la limite de plasticité  $W_P$ ,
- un état plastique : le sol a une cohésion notable mais se déforme sous l'effet de charges assez faibles pour une teneur en eau comprise entre la limite de plasticité et la limite de liquidité  $W_L$ ,
- un état liquide : le sol a une cohésion très faible et il a l'aspect d'un liquide.

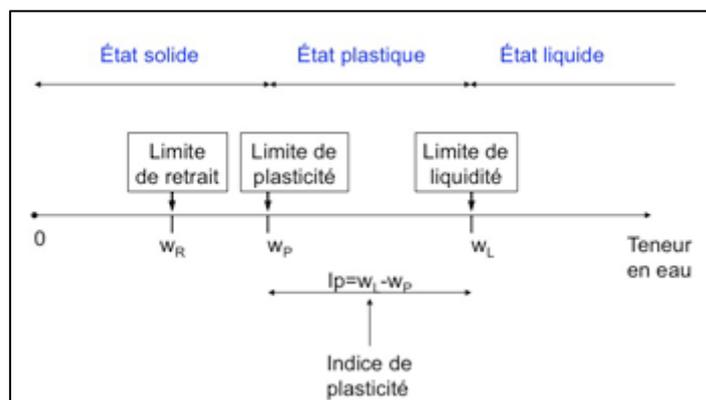


Figure 41 – Limites d'Atterberg

Les différentes grandeurs  $W_R$ ,  $W_P$ , et  $W_L$  sont des valeurs caractéristiques (intrinsèques) d'un sol, elles dépendent fortement de sa composition minéralogique et des cations échangés dans les argiles.

À partir des grandeurs  $W_L$  et  $W_P$ , on définit l'indice de plasticité  $I_P$  d'un sol :  $I_P = W_L - W_P$ .

Cet indice caractérise l'étendue du domaine de teneur en eau dans lequel le sol a un comportement plastique, et contient une quantité d'eau suffisante pour ne pas passer à l'état solide ( $W < W_P$ ). Il est très fortement lié à la quantité et à la nature des minéraux argileux présents dans le sol et à la surface spécifique des sols. Plus le sol possède de minéraux argileux actifs dans l'interaction avec l'eau, plus il sera nécessaire d'ajouter de l'eau au sol pour qu'il devienne liquide. En effet, une grande partie de cette eau sera adsorbée par la forte proportion en particules argileuses, empêchant le sol de passer à l'état liquide et restera à l'état pâteux, ce qui correspond à la phase plastique. Lorsque la capacité d'adsorption en eau sera atteinte pour  $W > W_L$ , toute l'eau en excès restera à l'état libre, c'est l'état « liquide » [28].

La classification des sols en fonction de leur indice de plasticité est la suivante :

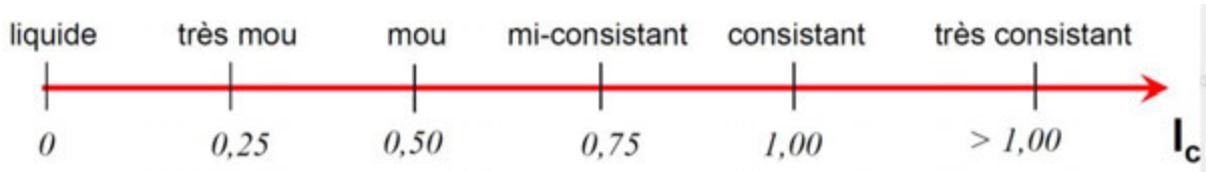
$I_P$	Plasticité
0	non plastique
1-5	très faiblement plastique
5-15	moyennement plastique
15-40	Plastique
>40	très plastique

Tableau 7 – Classification des sols en fonction de leur indice de plasticité

$$I_c = \frac{w_l - w}{I_p}$$

L'indice de consistance se calcule comme suit :

Il caractérise la consistance du sol, selon les critères suivants :



Casagrande a établi un diagramme de plasticité représentant l'évolution de l'indice de plasticité  $I_p$  en fonction de la limite de liquidité  $W_L$ . Ce graphique permet de distinguer et de classer les sols fins argileux ou limoneux en fonction de leur plasticité (Figure 42) [26]. Dakshanamurphy et Raman [29] se sont inspirés de ce diagramme pour établir une classification du potentiel de gonflement des sols. D'après Dakshanamurphy et Raman, il est possible d'apprécier le potentiel de gonflement à partir de la limite de liquidité  $W_L$ . Pour cela, les auteurs ont repris le diagramme de Casagrande et ont procédé au découpage de la ligne A en six zones à la suite d'observations en laboratoire. Ils ont pu ainsi constater que lorsque les échantillons dépassaient une limite de liquidité de 45%, les sols avaient tendance à prendre du volume et donc à gonfler.

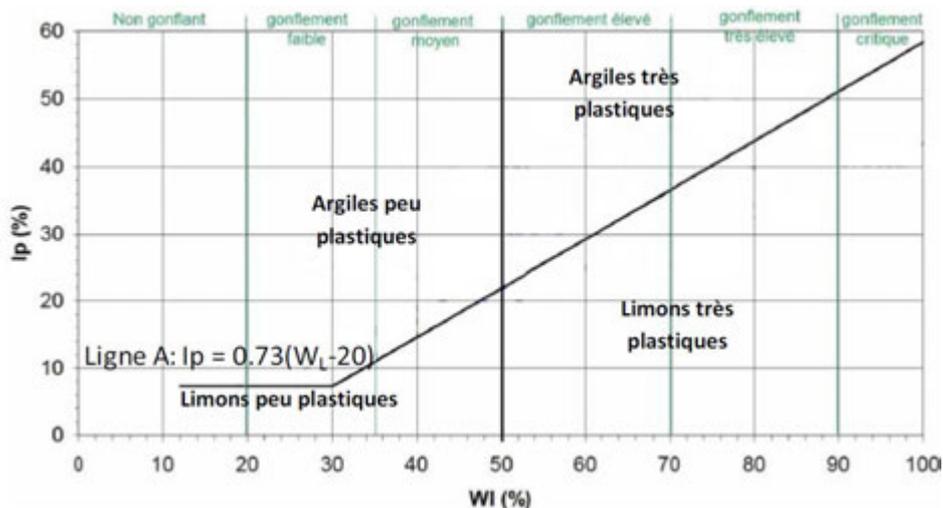


Figure 42 – Corrélation entre les propriétés du sol et le potentiel de gonflement - Diagramme de Casagrande et classification de Dakshanamurphy et Raman (1973) (tiré de [30])

D'autre part, l'essai au bleu de méthylène consiste à injecter une certaine quantité de bleu de méthylène, qui est adsorbée préférentiellement par les particules argileuses. Cet essai permet ainsi de mesurer la capacité d'adsorption en eau de la surface spécifique des argiles. Plus un sol absorbe de bleu, plus le sol contient des minéraux argileux actifs développant des surfaces spécifiques internes (espace interfoliaire) et externes (espace interparticulaire) importantes [28]. Cette surface est très représentative du minéral argileux prépondérant dans la phase argileuse. La valeur VBS s'exprime en masse de bleu pour 100 g de sol.

VBS	Type de sol
0,1	Sol insensible à l'eau
0,2	Seuil au-dessus duquel le sol est sensible à l'eau.
1,5	Seuil distinguant les sols sablo- limoneux des sols sablo- argileux.
2,5	Seuil distinguant les sols limoneux peu plastiques de sols limoneux moyennement plastiques
6	Seuil distinguant les sols limoneux et les sols argileux
8	Seuil distinguant les sols argileux des sols très argileux.

**Tableau 8 – Classification des sols en fonction de la valeur de bleu VBS**

Chassagneux *et al.* [31] ont établi des seuils de sensibilité des sols argileux au retrait-gonflement à partir de la valeur de bleu VBS (Tableau 9). Ces critères sont utilisés dans la classification géotechnique GTR<sup>11</sup>, en complément de l'indice de plasticité, afin de classer les sols fins suivant leur sensibilité à l'eau.

Valeur de bleu VBS	Sensibilité
< 2,5	Faible
2,5 - 6	Moyen
6 - 8	Forte
> 8	Très forte

**Tableau 9 – Sensibilité d'une argile au retrait-gonflement d'après [27]**

#### 7.4.1.2 Résultats obtenus sur les phases argileuses des terrains de Lochwiller

Les valeurs obtenues par GeoRessources sur les marnes et argilites de Lochwiller sont les suivantes :

Echantillon	Profondeur	W <sub>L</sub>	W <sub>P</sub>	I <sub>P</sub>	I <sub>C</sub>	VBS
SC4-2	3,4-3,6	39	32	7	2,1	3,74
SC4-4	7,5-7,6	38	32	6	2,5	3,36
SC5-1	3,8-4,0	39	31	8	3,1	2,50
SC5-3	7,10-7,25					2,13
SC6-2	6,3-6,45	43	36	7	3,8	2,73
SC6-5	17,85-18,0					1,62
SC7-9	10-10,12	34	29	5	3,7	
SC7-11	27,05-27,20					1,75
SC7-13	36,10-36,25					1,32

**Tableau 10 – Résultats des mesures de limites d'Atterberg et valeur de bleu de méthylène**

Les indices de plasticité indiquent des terrains faiblement à moyennement plastiques. Les indices de consistance, quant à eux, montrent des terrains très consistants. Reportés sur le diagramme de Casagrande, modifié par Dakshanamurphy et Raman, les sols de Lochwiller, du point de vue de leurs composants argileux uniquement (les minéraux sulfatés ne sont pas pris en considération), sont classifiés dans les limons peu plastiques, avec un potentiel de gonflement moyen.

Les valeurs de bleu indiquent par ailleurs des sols limoneux peu plastiques à moyennement plastiques. La sensibilité des sols au retrait-gonflement des terrains d'après [31] serait faible à moyenne.

<sup>11</sup> GTR : Guide Technique pour la Réalisation des remblais et des couches de forme.

## 7.4.2 Essais de gonflement ou essais œdométriques

### 7.4.2.1 Définition, objectifs et protocole des essais

Le comportement gonflant par hydratation (d'anhydrite et/ou d'argiles) des sols et des roches peut être testé en laboratoire par des essais de gonflement, encore appelés essais œdométriques. Ils consistent en l'introduction d'un échantillon rocheux sélectionné et taillé sous forme cylindrique (20 mm de hauteur, 40 mm de diamètre) dans un œdomètre. Il s'agit d'une cellule qui permet uniquement la déformation axiale d'un échantillon (la déformation radiale est maintenue constante par les parois de la cellule). La contrainte axiale exercée sur l'échantillon est maîtrisée. Une pression interstitielle est maintenue stable tout au long de l'essai, à l'aide de deux injecteurs, situés aux deux extrémités de l'éprouvette. Le fluide injecté est de l'eau recueillie sur site.

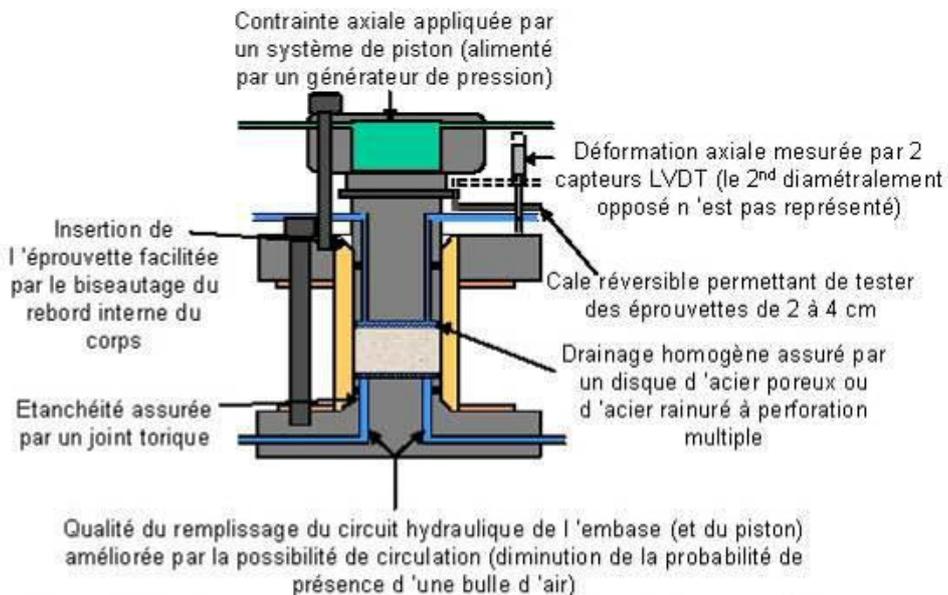


Figure 43 - Représentation schématique de la cellule œdométrique (source : GeoRessources, Annexe 13)

GeoRessources a proposé deux protocoles, le premier aboutissant à l'évaluation de la pression de gonflement, et le second au potentiel de gonflement, grandeurs qui, selon ce laboratoire, sont à peu de choses près équivalentes.

Le protocole retenu est le second. Il se définit comme suit :

On laisse se déformer axialement l'échantillon (les déplacements radiaux sont bloqués par l'anneau œdométrique) puis après stabilisation, on augmente la force axiale pour revenir à la hauteur initiale de l'échantillon. Les étapes sont les suivantes :

- Chargement axial équivalent à la profondeur de prélèvement - Attente de la stabilité en déplacement axial.
- Injection en amont et aval du fluide (eau prélevée par GEODERIS sur le forage SC4) avec une pression d'injection pouvant correspondre à celle présente *in situ*.
- Enregistrement de l'augmentation du déplacement axial avec un capteur de déplacement ayant une sensibilité de 0,001 mm. Attente de la stabilité du déplacement.
- Augmentation de la force pour retrouver la hauteur initiale de l'échantillon.

GeoRessources précise que la difficulté de ces mesures est fortement liée à la nature hétérogène du matériau. Une attention particulière est donnée quant à la représentativité entre l'analyse minéralogique et la pression de gonflement mesurée. Le laboratoire procède donc à l'analyse minéralogique de l'échantillon avant et après l'essai œdométrique afin de vérifier l'évolution géochimique du matériau.

#### 7.4.2.2 Résultats obtenus

Trois premiers essais de gonflement ont été initiés le 21 août 2015 sur les échantillons SC4-7 (prélevé à 210,65 m), SC4-20 (prélevé à 205,5 m) et SC7-16 (prélevé à 204,05 m) et deux essais supplémentaires ont débuté le 9 novembre 2015 sur les échantillons SC5-18 (prélevé à 205,8 m) et SC6-17 (prélevé à 199,0 m). Le retard de démarrage de ces deux essais tient au délai de construction de deux nouvelles cellules œdométriques par GeoRessources.

Les analyses minéralogiques de ces cinq échantillons sont présentées dans le tableau suivant.

Echantillons	SC4-7		SC4-20		SC5-18		SC6-17		SC7-16		
	Avant	Après									
Profondeurs (m)	9,65-9,80		14,80-15,00		25,95-26,10		20,00-20,10		44,5-44,70		
Cote (m NGF)	210,65		205,5		204,05		205,8		199		
Zone saturée/ non saturée	non saturée		saturée		saturée		saturée		saturée		
Zone gonflée / intègre	zone gonflée		zone gonflée		zone intègre		zone gonflée		zone intègre		
Composition minéralogique (%)	Illite	6,8		6,9		7,0		3,0		5,4	
	Smectites	9,1		2,1		10,0		2,0		7,5	
	Chlorite	0,1		2,0				2,0		0,8	
	Gypse	34,9	40,1	31,0	31,1	52,0	54,2	85,0	85,0	15,0	16,4
	Anhydrite	25,0	19,8	0,9	0,8	18,0	15,8			46,9	45,5
	Dolomite	15,0		8,1		4,0		1,0		1,7	
	Calcite			12,0							
	Magnésite			19,4		6,0		3,0		14,0	
	Quartz	5,9		15,0		3,0		4,0		8,7	
	Orthoclase	3,2									
	Albite			2,6							
Potentiel de gonflement G = 1,4MPa G non déterminable G = 1,13 Mpa G = 1,5MPa G = 1,5MPa											

**Tableau 11 – Résultats des analyses minéralogiques des échantillons soumis aux essais œdométriques**

Les photographies des échantillons avant essais sont fournies en Figure 44.

La composition minéralogique n'est pas visible à l'œil nu, le choix des échantillons s'est donc effectué « à l'aveugle » de ce point de vue. La répartition zone gonflée / zone intègre n'était pas connue alors. Ils ont été sélectionnés pour leur cohésion, sachant qu'une éprouvette ne peut être carottée si l'échantillon se délite. Il en ressort malheureusement que les échantillons SC4-20 et SC6-17 ne contiennent pas (ou extrêmement peu) d'anhydrite. Les autres échantillons contiennent de l'anhydrite en quantités intéressantes pour les essais.

Les échantillons ont été soumis à la contrainte qui s'exerçait sur eux dans le sous-sol, du fait du poids des terrains sus-jacents. Dans un premier temps, un tassement a été observé, provenant du fait que les échantillons, soumis à cette contrainte, reprenaient leur volume initial. Après un délai, un gonflement a été observé sur certains échantillons. Le détail est fourni ci-dessous (cf. rapport de GeoRessources en Annexe 13).



Figure 44 – Photographies des échantillons soumis aux essais œdométriques (avant essais)

- SC4-7

Après une période d'environ 42 jours de retrait, l'échantillon SC4-7 (Figure 45) a présenté une phase de gonflement (0,092 mm au total) qui s'est amortie vers le 90<sup>ème</sup> jour. En effet, GeoRessources a pu observer une stabilité du déplacement mesuré. Au 125<sup>ème</sup> jour (un peu plus de 4 mois), une contrainte de 1,40 MPa a dû être exercée pour que l'échantillon ait repris son volume initial. Il s'agit du potentiel de gonflement.

Le gonflement observé est équivalent à 0,46% du volume initial.

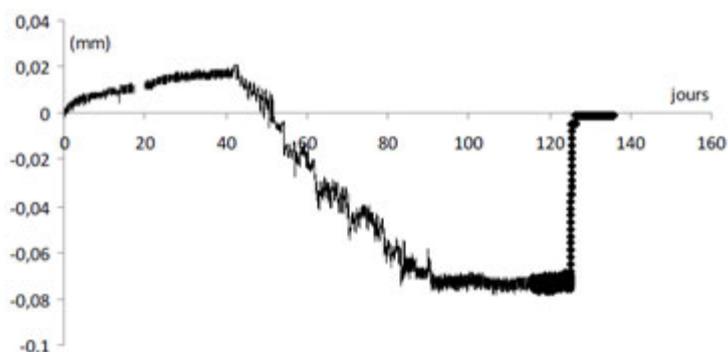


Figure 45 – Evolution du déplacement mesuré en fonction du temps - SC4-7 (pression injection : 0,10 MPa, et pression de confinement : 0,33 kN)

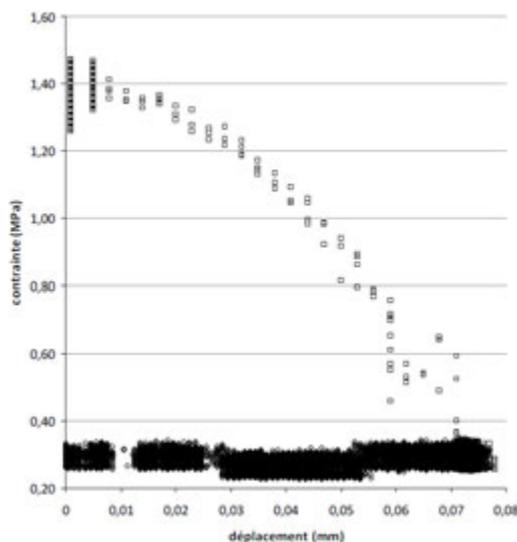


Figure 46 – Détermination du potentiel de gonflement - SC4-7

- SC4-20

Pour l'échantillon SC4-20 (Figure 47), qui ne contient quasiment que du gypse, et 2% d'argiles gonflantes, GeoRessources a pu observer un début de gonflement après 42 jours de retrait, cependant ce gonflement s'est arrêté très rapidement, ensuite les mesures de déplacement étant stables, il n'est plus possible d'y associer de retrait ou de gonflement. Le déplacement a depuis été ramené à zéro. Il semble au vu de ces résultats que les smectites seules à hauteur de quelques % ne soient pas responsables d'un gonflement significatif.

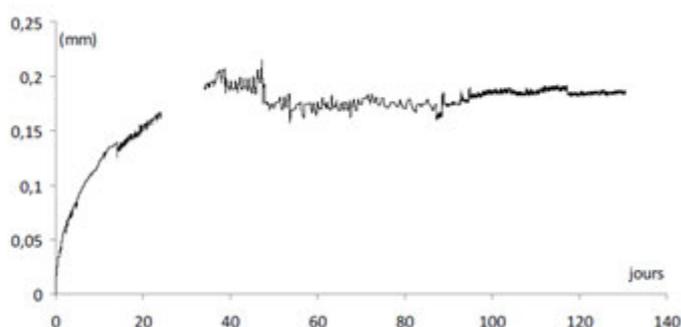


Figure 47 – Evolution du déplacement mesuré en fonction du temps - SC4-20 (pression injection : 0,16 MPa, et pression de confinement : 0,52 kN)

- SC7-16

Pour l'échantillon SC7-16 (Figure 48), les déplacements mesurés sont très peu importants. Des oscillations de quelques microns seulement sont enregistrées. Nous sommes par conséquent à la limite de détection par rapport à la sensibilité des capteurs de déplacement. Néanmoins, à partir du 80<sup>ème</sup> jour, une tendance à un gonflement qui reste peu marquée s'est amorcée. En effet, un déplacement de -17 microns a été enregistré sur une période de 20 jours environ. Cette tendance s'est amortie. Au 132<sup>ème</sup> jour (4 mois et demi après le début de l'essai), une contrainte de 1,50 MPa a dû être exercée pour que l'échantillon ait repris son volume initial. Il s'agit du potentiel de gonflement.

Les analyses minéralogiques montrent que le pourcentage d'anhydrite est passé de 46,9 à 45,5 et le pourcentage de gypse de 15,0 à 16,4. Le gonflement observé est équivalent à 0,08% du volume initial, c'est très faible au regard des teneurs en anhydrite avant gonflement. Le gonflement est incomplet.

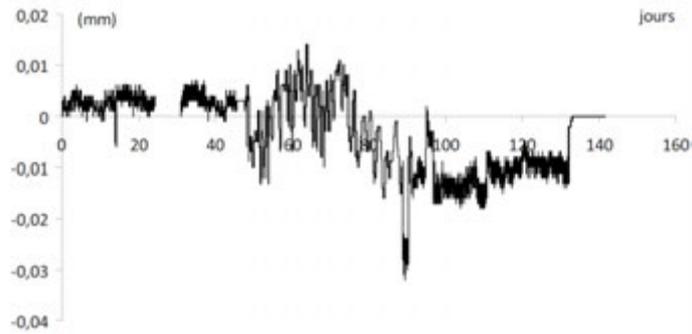


Figure 48 – Evolution du déplacement mesuré en fonction du temps - SC7-16 (pression injection : 0,45 MPa, et pression de confinement : 1,50 kN)

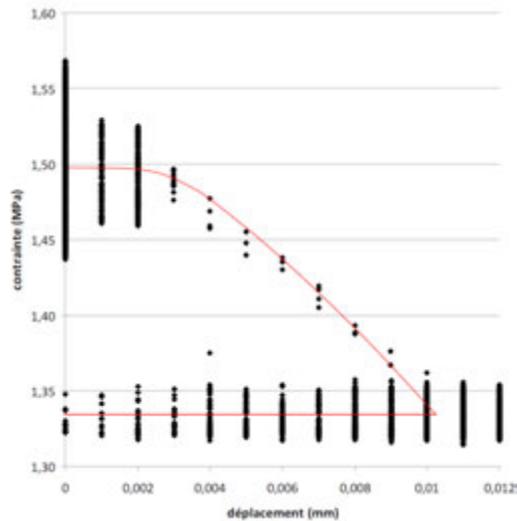


Figure 49 – Détermination du potentiel de gonflement - SC7-16

- SC5-18

Suite à la mise en place de l'échantillon SC5-18 (Figure 50), et après 58 jours, un gonflement rapide est survenu et s'est amorti au 70<sup>ème</sup> jour. Un déplacement d'environ 0,044 mm a été mesuré, ce qui correspond à 0,22% d'augmentation du volume initial. Les analyses minéralogiques montrent que le pourcentage d'anhydrite est passé de 18 à 15,8% et le pourcentage de gypse de 52 à 54,2%. Le gonflement est donc inachevé.

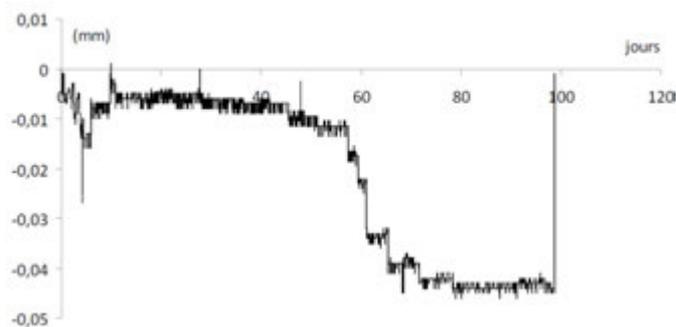


Figure 50 – Evolution du déplacement mesuré en fonction du temps - SC5-18 (pression injection : 0,25 MPa, et pression de confinement : 0,90 kN)

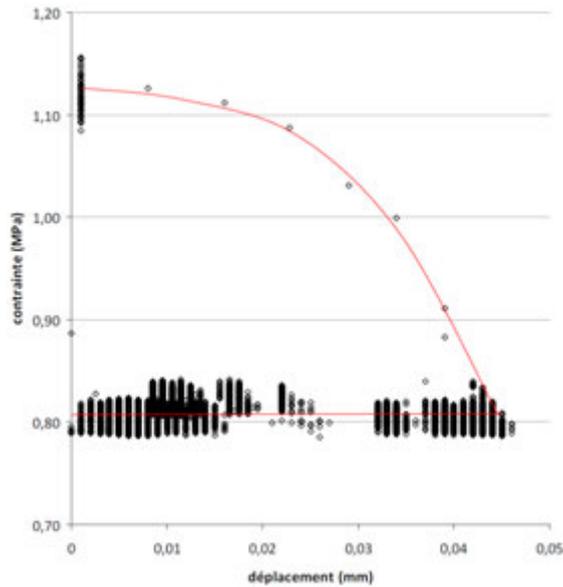


Figure 51 – Détermination du potentiel de gonflement - SC5-18

- SC6-17

Pour l'échantillon SC6-17 (Figure 52), un déplacement négatif a été observé dès la mise en place de l'essai. Cette phase précoce de gonflement est peu probable : GeoRessources a attribué ce comportement à une phase d'équilibre de l'échantillon dans la cellule c'est-à-dire à une reprise des jeux mécaniques lors du montage de la cellule œdométrique. Après 50 jours, un gonflement réel s'est amorcé, jusqu'à 90 jours environ. Le volume de l'éprouvette a augmenté de 0,25%. Etant donné la teneur en gypse (85%) et l'absence d'anhydrite, le seul gonflement qui s'est produit est probablement lié à la présence de smectites, toutefois leur teneur est faible (2%).

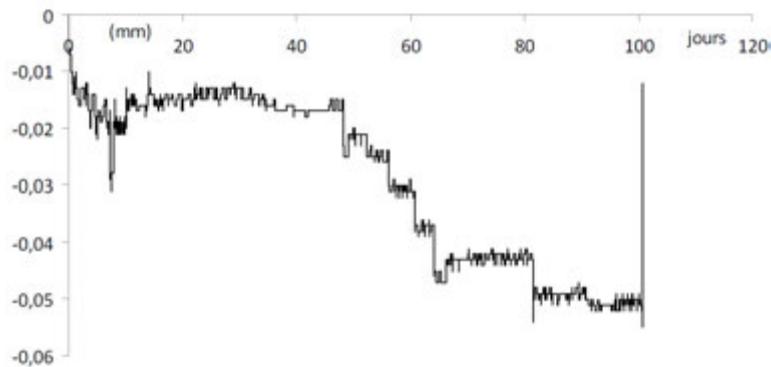


Figure 52 – Evolution du déplacement mesuré en fonction du temps - SC6-17 (pression injection : 0,18 MPa, et pression de confinement : 0,70 MPa)

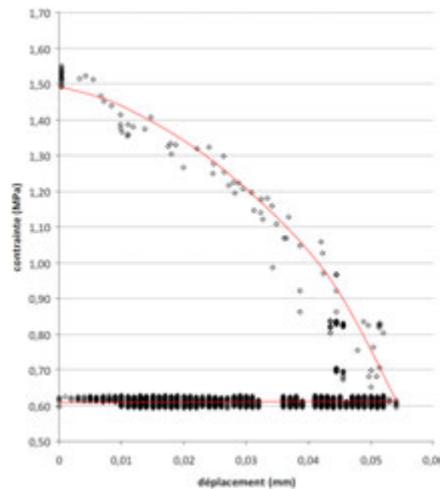


Figure 53 – Détermination du potentiel de gonflement - SC6-17

### 7.4.2.3 Interprétation des essais de gonflement

- Intensité du gonflement obtenu

Le potentiel de gonflement mesuré pour les 5 échantillons oscille entre 1,13 MPa et 1,50 MPa. Les gonflements obtenus sont très incomplets, au regard des teneurs en anhydrite initiales, et surtout au vu des teneurs en anhydrites finales. Seul quelques % d'anhydrite au mieux ont été transformés en gypse. GeoRessources estime que la cinétique d'hydratation est très lente, et que les pressions de gonflement maximales n'ont pas été atteintes.

Les échantillons SC4-7, SC5-18 et SC7-16 ont montré un gonflement de faible amplitude (respectivement 0,46%, 0,22% et 0,08%), au regard du gonflement théorique (en admettant un gonflement de 62% pour l'anhydrite) de 15%, 11% et 29%, minimum, sachant que Pimentel a précisé qu'un gonflement dû à la fissuration se surimposait de toute façon (« *cracking* »).

Il est donc probable que la précipitation du gypse en périphérie de l'échantillon ait cimenté la porosité de l'échantillon, empêchant la circulation de l'eau en son sein et bloquant ainsi le gonflement et donc le déplacement axial.

- Difficulté d'approches entre essais de gonflement et gonflement *in situ*

Les essais de gonflement réalisés ont pour objectif de tenter de relier l'intensité de la surrection à l'intensité du gonflement des matériaux présents dans le sous-sol, afin d'évaluer l'intensité du gonflement restant à survenir. Quelques calculs simples présentés ci-dessous montrent toutefois la difficulté d'une telle approche.

Le gonflement de l'anhydrite provient de l'incorporation de molécules d'eau à sa structure cristalline, qui conduit à une transformation finale en gypse. Ces deux minéraux étant très solubles, le processus d'hydratation interfère certainement avec un mécanisme de dissolution-précipitation qui peut changer la structure de l'espace poral en fonction de la forme des cristaux. Des cristaux aciculaires auront par exemple tendance à moins remplir les pores que des cristaux plus compacts mais ils modifieront peut-être plus intensément les contraintes intergranulaires. On peut aussi imaginer qu'une partie de la matière est évacuée par la circulation de l'eau si la précipitation du gypse n'est pas instantanée. Il semble donc très difficile de pouvoir relier un bilan matière à l'intensité du gonflement tant le phénomène apparaît complexe.

À titre d'exemple, considérons le bilan massique et volumique dans un système particulièrement simple constitué d'un volume  $V$  contenant un volume solide  $V_s$  d'anhydrite pure avec une porosité  $\varepsilon$ . L'espace poral est envahi par l'eau et l'anhydrite va se transformer en gypse.

Les caractéristiques des phases en présence sont les suivantes :

- Anhydrite : masse molaire  $M_1= 136,15$  g/mol      densité  $d_1= 2,96$
- Gypse :      masse molaire  $M_2= 172,18$  g/mol      densité  $d_2= 2,32$
- Eau :      masse molaire  $M_3 : 18$  g/mol      densité  $d_3= 1$

#### Hypothèse 1 :

Le système est ouvert par rapport à l'eau, l'eau peut circuler librement dans l'espace poral. On calcule le coefficient de gonflement  $\alpha = (M_2/d_2) \times (d_1/M_1) = 1,61$ .

On calcule la nouvelle porosité  $\varepsilon'$  après gonflement, en admettant que le gypse néoformé se développe dans l'espace poral.

$$V = V_s + \varepsilon V \text{ à l'état initial}$$
$$V = \alpha V_s + \varepsilon' V \text{ après gonflement}$$

$$\text{d'où } \varepsilon' = 1 - \alpha + \alpha \varepsilon$$

On constate que la porosité résiduelle  $\varepsilon'$  s'annule pour une porosité initiale de 38%. Par conséquent un milieu rocheux dont la porosité initiale est supérieure à cette valeur ne gonflera pas et un milieu de porosité inférieure gonflera dans la proportion  $\alpha' = \alpha (1 - \varepsilon)$  inférieure à  $\alpha$ . Il faut une porosité initiale nulle pour obtenir le gonflement théorique de 61% ; mais dans un tel milieu le processus aura du mal à démarrer car l'eau n'arrivera pas facilement au contact de l'anhydrite.

#### Hypothèse 2 :

Le système est fermé par rapport à l'eau, l'eau d'hydratation est supposée uniquement provenir des pores locaux, elle libère donc du volume lorsqu'elle s'incorpore aux cristaux.

On calcule le coefficient de gonflement  $\alpha = (M_2/d_2 - 2M_3/d_3) \times (d_1/M_1) = 0,83$ .

On constate que le milieu ne gonfle pas mais au contraire se rétracte. Ceci peut expliquer pourquoi des milieux riches en anhydrite massive apparaissent comme particulièrement secs et stables.

On montre ainsi que selon la porosité initiale de l'échantillon, le gonflement peut être optimum aussi bien que nul, si cette dernière est très importante et que le gypse a la place pour cristalliser. Ces calculs sont très simplistes, ils ne considèrent pas en particulier la présence d'une phase argileuse gonflante, ni l'apparition de fissures qui peuvent contribuer à l'augmentation du volume rocheux. E. Pimentel a en effet montré que l'augmentation volumique d'un échantillon rocheux riche en anhydrite et en présence d'eau provient également, par la cristallisation du gypse, de la fissuration de l'échantillon. Il a introduit le concept de « *cracking* » [17] [18]. Les calculs ont simplement pour but de montrer combien il est difficile d'appréhender par des essais de laboratoire des valeurs de gonflement et des cinétiques applicables sur le terrain. De plus, il est très hasardeux de vouloir extrapoler les résultats d'essais en laboratoire aux phénomènes *in situ*, en termes de cinétique et d'amplitude, car les conditions hydrogéologiques sont très différentes sur le terrain, les couches à évaporites sont très hétérogènes en termes de minéralogie, etc. E. Pimentel,

valide, dans son expertise, qu'il n'est donc pas possible de prédire les taux de gonflement des roches basées uniquement sur leur composition minéralogique, et qu'il n'est, par ailleurs, pas possible de définir une pression de gonflement maximale par des essais œdométriques tels qu'ils ont été proposés par GeoRessources. Selon lui, l'application d'une charge pour faire revenir l'échantillon à son volume initial ne peut avoir de résultats fiables que si le processus est réversible, soit sur un matériau à comportement élastique. Cela n'est pas le cas d'un échantillon rocheux qui gonfle et se fissure sous l'effet de la précipitation du gypse. Il aurait fallu, pour obtenir une pression de gonflement maximum, réaliser des tests sous conditions complètement contraintes [18].

**E. Pimentel précise que l'extrapolation de résultats d'essais de gonflement en laboratoire à l'échelle du milieu rocheux en place est un problème qui n'est pas résolu à l'heure actuelle, notamment en termes d'interprétation des contraintes de gonflement maximum, des taux de gonflement aussi bien que du développement des processus en termes de cinétique. Comme vu ci-avant, la raison de ces incertitudes peut être attribuée, entre autres, à l'hétérogénéité naturelle du Keuper à gypse avant gonflement, à la formation de fissures, et aux changements dans les conditions de circulation et dans la composition chimique des eaux souterraines.**

**De ce fait, il affirme qu'il n'est pas possible de prévoir l'évolution des processus de gonflement dans le temps, aussi bien que l'effet de mesures d'atténuation, même si l'on effectuait des essais œdométriques dans des conditions mieux adaptées. Une extrapolation des résultats acquis par des mesures *in situ* permettrait seulement une estimation du comportement à prévoir dans un futur proche, en termes de soulèvement.**

Quoi qu'il en soit, selon le graphique fourni dans l'article de Sass et Burbaum [15], et qui présente les domaines de gonflement de l'anhydrite dans un sous-sol, au regard de la contrainte exercée par les terrains de recouvrement, le poids des terrains ne peut s'opposer au gonflement de l'anhydrite qu'à partir de 61 m d'épaisseur. Ce n'est pas le cas à Lochwiller. Ici, le gonflement, reconnu entre 180-203 m NGF et 211 m NGF *grosso modo*, est profond au maximum de 9 m au droit de la maison Schorr, et de 30 m environ au droit de la maison Amman. Les contraintes de gonflement maximum à attendre dans le Keuper à gypse dépassent la contrainte exercée par la couverture (environ 1 MPa pour 40 m).

Ce graphique, adapté au cas de Staufen, est issu de trois articles de Steiner [32] [33] et [34].

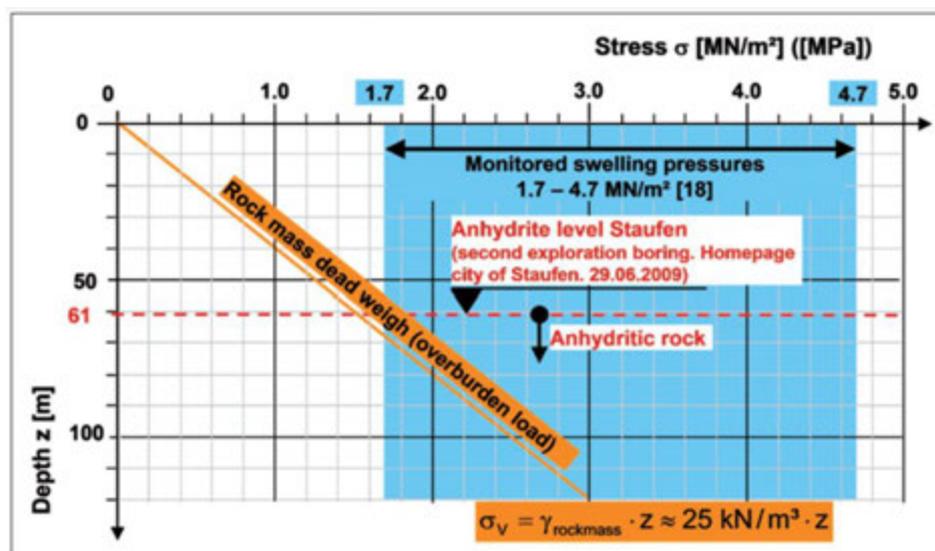


Figure 54 – Pression de gonflement et contrainte exercée par les terrains de recouvrement [15], d'après [32], [33], [34]

### 7.4.3 Mouvements de terrain en jeu

Les mesures de déplacement réalisées tous les deux mois par le BRGM-DPSM mettent en évidence que la partie supérieure du lotissement subit un déplacement vertical très important, ainsi que des déplacements horizontaux.

Selon E. Pimentel, ces déplacements horizontaux peuvent avoir plusieurs causes possibles :

- (1) la couche d'anhydrite ne gonfle pas uniformément mais plus à certains endroits que d'autres, c'est-à-dire près du coin sud-est de la maison Belhadj-Kobloth, créant ainsi un relief avec de la déformation radiale autour de la zone de plus forte activité ;
- (2) si la contrainte horizontale est plus faible ou similaire à la contrainte verticale, le gonflement peut aussi bien se produire dans une direction horizontale ;
- (3) le soulèvement horizontal peut provoquer un glissement des couches supérieures de la pente. Un tel glissement peut provoquer une pression latérale sur des habitations, ce qui est particulièrement pressenti sur l'habitation Schmitz.

Du fait du soulèvement non uniforme, en combinaison avec les déplacements horizontaux susmentionnés, des crevasses apparaissent, comme dans l'impasse du Koelberg ou derrière la maison Kromer-Borowiak, permettant à l'eau de pluie de s'infiltrer à la fois dans les couches supérieures (ce qui ramollit les sols et peut provoquer ou accélérer des glissements de terrain), et dans le Keuper plus profond. Le ramollissement des sols augmente la pression latérale sur les maisons, spécialement à l'occasion d'épisodes pluviométriques intenses, ce qui, ainsi, provoque des dommages supplémentaires sur certaines habitations. Cela peut affecter les maisons les plus anciennes en pied de pente (Schorr, Schellinger, Schmitz). Les infiltrations en profondeur accélèrent le gonflement dans la zone intègre. Cela pourrait expliquer la relation entre la pluviométrie et le taux de déformation mise en évidence en 2014 [1] : l'infiltration de la pluie provoque le glissement des couches et accélère le gonflement de l'anhydrite.

E. Pimentel attire l'attention sur le fait que ces phénomènes ne peuvent être suivis et identifiés par les seules mesures de déplacement en surface. La seule façon de caractériser un mécanisme actif est la mesure de la déformation du sous-sol en profondeur. Des recommandations en ce sens sont fournies au § 9.

## 8 SYNTHÈSE ET INTERPRÉTATION DES INFORMATIONS ACQUISES

### 8.1 Synthèse des observations et des analyses géologiques, minéralogiques, hydrogéologiques et chimiques

La figure proposée à la page suivante (Figure 55) synthétise les observations établies sur l'aspect et de la couleur des argilites et des marnes, sur les pourcentages d'évaporites et leur nature prédominante, ce qui a permis la localisation des zones altérée, gonflée et intègre, et sur la présence de fractures en fonction de la profondeur. Les niveaux d'eau observés entre 2015 et 2016 ont été ajoutés, ainsi que les niveaux supposés en cours de gonflement.

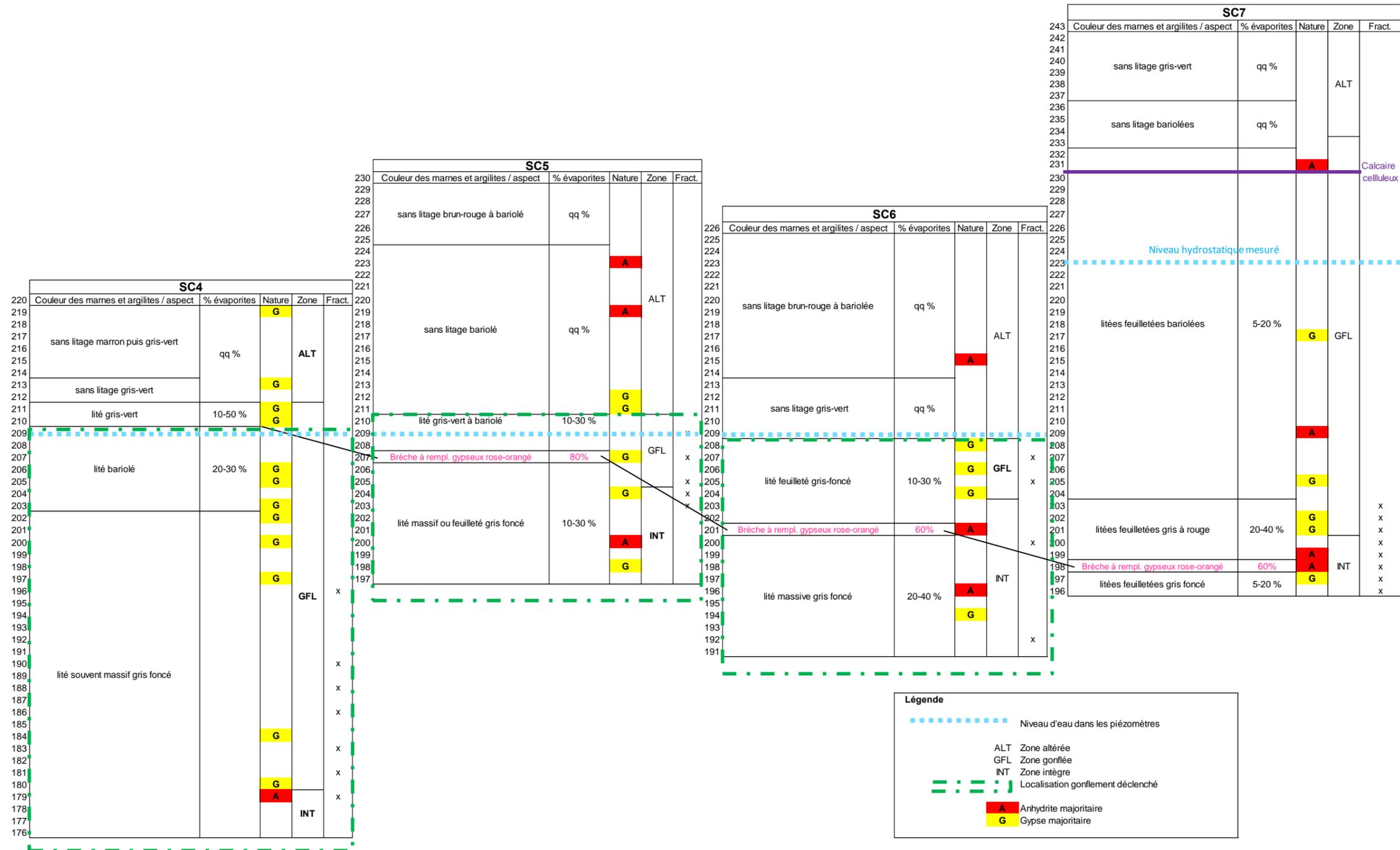


Figure 55 – Synthèse de l'aspect et de la couleur des argilites et des marnes, des % d'évaporites et de leur nature majoritaire, de la présence de fractures en fonction de la profondeur

- Hypothèse d'une zone altérée

Les terrains à anhydrite présents dans le sous-sol de Lochwiller sont des argilites à évaporites (anhydrite et gypse), à tendance parfois calcaire ou dolomitique, ou encore silteuse.

Sous la surface, et sur une profondeur variant autour de 10-20 m, l'existence d'une zone altérée sous la surface du sol a été mise en évidence. Les terrains sont argileux, sans litage apparent, de couleurs différentes, souvent bariolées. Un même banc, riche en minéraux sulfatés (20-40%) rencontré dans le forage SC7 ne contient plus que quelques % d'évaporites dans le forage SC4 à quelques mètres sous la surface. Des eaux superficielles auraient donc circulé lentement dans les premiers mètres sous le sol dans ces formations peu perméables, auraient hydraté l'anhydrite en gypse, et dissous enfin ce gypse jusqu'à le rendre quasi-absent, sous la forme de poudre blanche ou de petits granules roses. Ce phénomène aurait laissé des argilites déstructurées, ce qui provoque une augmentation locale de la porosité et de la perméabilité des terrains. La nature anhydritique des granules analysés sur SC5, SC6 et SC7 conduit à pencher pour une autre hypothèse, qui consiste à penser que l'anhydrite aurait été dissoute par les circulations superficielles, mais que les solutions sulfatées auraient migré plus loin (précipitant éventuellement le gypse plus loin), ne laissant que des granules et de la poudre d'anhydrite.

Cette zone altérée, mentionnée dans la littérature comme « *weathered Keuper* » ou « *leached Keuper* », se trouve actuellement non saturée dans tous les forages. De ceci, il a été déduit qu'un aquifère « historique » s'était développé, avant la construction du lotissement, et certainement bien avant l'existence du village de Lochwiller, durant le Quaternaire, dans les premiers mètres sous la surface, par l'infiltration des eaux météoriques. En régime naturel, la propagation de l'altération en profondeur est très lente car l'infiltration reste faible et une partie de l'eau infiltrée se trouve drainée avant d'atteindre les évaporites saines. La pente de la colline drainait donc certainement ce ruissellement hypodermique vers le pied de versant, puis vers le ruisseau Dachsgaben. L'aquifère superficiel ainsi formé est peu épais et très peu productif mais permet toutefois d'alimenter des particuliers. Il a été noté que les eaux du ruisseau Dachsgaben présentaient des composantes sulfatées et calciques importantes, laissant penser qu'il constitue l'exutoire de circulations souterraines dans des formations évaporitiques en cours d'évolution minéralogique et/ou dissolution.

- Description géologique et minéralogique des terrains situés sous la zone altérée - Localisation du gonflement

Sous l'épaisseur de terrains altérés, l'aspect des bancs change très rapidement et devient radicalement différent. D'argiles et de marnes non litées, massives, les terrains deviennent assez brutalement finement lités, à fines lamines blanches, de nature sulfatée, qui représentent une part volumique de 10 à 50% globalement, selon les niveaux. Les couleurs des bancs se corrélaient difficilement, surtout lorsque les marnes sont bariolées. Ainsi, le paramètre couleur n'a pas permis de s'y fier pour établir les corrélations entre les forages.

Il est possible, afin de recalibrer la série sédimentaire et de corréler les bancs entre eux, de suivre un banc épais de 70-80 cm environ, composé d'argilites d'aspect bréchique, qui comporte des vides de fracturation importants comblés par des minéraux sulfatés d'aspect saccharoïde rose sur SC5, et plutôt orangés translucides sur SC6 et SC7. Ce banc particulier s'observe uniquement sur les forages SC5, SC6 et SC7<sup>12</sup>, et forme un plan orienté précisément comme le pendage géologique calculé d'après la corrélation des diagraphies

---

<sup>12</sup> Cotes du banc bréchique : **SC5** : 206,5-207,2 m NGF, **SC6** : 200,0-200,8 m NGF, **SC7** : 198,6-199,25 m NGF.

gamma-ray. Il semble donc que cette sorte de brèche intra-formationnelle soit continue à l'intérieur des couches sédimentaires, et que l'on puisse s'y fier pour les corrélations des bancs. Les analyses minéralogiques montrent que sur SC5, la nature du remplissage est gypseux (83% de gypse, 1% d'anhydrite), et sur SC6 et SC7 sa nature est plutôt anhydritique à composante gypseuse (75% d'anhydrite, 11% de gypse sur SC6, et 47% d'anhydrite, 15% de gypse sur SC7). Si la corrélation proposée est juste, une transformation des minéraux apparaît de manière évidente.

Ce banc serait présent vers 212,0-212,5 m NGF dans SC4, soit vers 9 m de profondeur. L'observation des carottes montre que l'argile semble beaucoup moins compacte à ce niveau (cf. photos des carottes en Annexe 6). Il a très certainement été dissous par les circulations d'eau dans la zone altérée, et pourrait être responsable, peut-être en partie seulement, des pertes de fluides de forages et de coulis qui ont été observées au cours du rebouchage du forage géothermique, et au cours de la foration de SC4. Si on le prolonge vers l'ouest, on note qu'il recoupe la surface du sol au pied de la grange Schorr (voir Figure 57 page 92). Cela irait dans le sens d'une circulation hydraulique via les vides laissés par ce niveau dissous, circulation responsable des venues d'eau observées en 2008, trois semaines après la foration.

Dans la zone non altérée, en-dessous de ce banc particulier, sont observées des marnes souvent feuilletées à lamines sulfatées gris foncé. Au-dessus de ce banc repère, les marnes sont grises à gris-vert, puis, en remontant encore vers la surface, elles sont plutôt bariolées (se reporter à la Figure 55 page 81). Ces observations sont en accord avec les descriptions de Rashid [4] (cf. § 6.3.1.3), qui montrait qu'au sein d'une même séquence de dépôt, dans les Marnes irisées inférieures de Lorraine, se rencontraient, du bas vers le haut :

1. des argilites noires à gris sombre, stratifiées par des fines lamines anhydritiques ayant précipité dans un milieu immergé réducteur ;
2. puis des argilites gris-vert, plus ou moins bien stratifiées ou même massives, constituant un faciès intermédiaire, déposé dans des eaux moins réductrices et moins concentrées que les argilites sombres, et dans un environnement moins profond. Elles ne comportent plus de lamines d'anhydrite mais plutôt des nodules, ou de l'anhydrite en imprégnation ;
3. des argilites rouges ou bariolées qui doivent leur couleur à la présence d'hématite. Ces dépôts doivent être exposés à l'air obligatoirement, pour conserver leur couleur rouge. Ces dépôts contiennent également de l'anhydrite. Cette phase d'émersion s'accompagne de déformations des structures, fissurations, diagenèses diverses, dissolution, érosion, etc.

Les fractures verticales à subverticales observées à Lochwiller, et contenant un remplissage gypseux, se rencontrent plutôt dans les argilites gris foncé et gris-vert, sauf sur le forage SC7, où elles sont extrêmement denses dans les marnes grises, et grises à rouges situées respectivement juste au-dessus et au-dessous du banc repère à minéraux roses.

D'un point de vue minéralogique, les lamines et les nodules de minéraux sulfatés sont de composés d'anhydrite et de gypse. La bassanite détectée dans un premier temps était un artefact analytique, les contre-analyses ont validé son absence.

Les phases sulfatées sont de nature essentiellement gypseuse à proximité immédiate du forage géothermique sur toute la hauteur du forage SC4, ce qui indique que les transformations minéralogiques sont très avancées. L'anhydrite est très minoritaire. Le gonflement, au vu des informations minéralogiques et relatives aux teneurs en eau, semble se produire sur toute la hauteur du forage (minimum 180 à 210 m NGF). Les minéralogistes

ont estimé que le gypse était toujours secondaire (valable pour les quatre forages), sauf sur l'échantillon SC4-19, présent en fond de forage, qui contient de 35% d'anhydrite et 27% de gypse primaire.

Au droit de l'épicentre du gonflement (SC5), les transformations minéralogiques paraissent très avancées également, en particulier 5-6 m au-dessous de la surface de la nappe et de la base de la zone altérée, avec quasiment uniquement du gypse en présence (tranche 205-210 m NGF). Plus en profondeur, l'anhydrite reste encore relativement présente, bien que du gypse secondaire ait commencé à apparaître. La teneur en eau étant faible (4,2%) à 9 m sous la nappe, et les transformations minéralogiques moins avancées, il est probable que l'aquifère soit moins développé dans cette tranche profonde.

En aval pendage de l'épicentre, au droit des forages SC6 et SC6-2, la tranche humide qui comprend l'aquifère et où des transformations minéralogiques sont bien avancées au vu de la présence largement majoritaire de gypse, est située entre 204 m NGF et 209 m NGF. Plus bas, l'anhydrite est majoritaire, et les terrains sont plus secs, ce qui semble montrer des circulations d'eaux moins aisées dans ces niveaux. Dans le fond du forage, les transformations sont moins avancées.

En vue de valider cette localisation du gonflement, E. Pimentel recommande de réaliser des mesures de déplacements dans le Keuper.

Enfin, en dehors du périmètre supposé du gonflement, au droit du forage SC7, les lamines de minéraux sulfatés sont constitués essentiellement de gypse jusqu'à 201 m NGF, et de gypse et d'anhydrite en proportions variables entre 197 m NGF et 201 m NGF. Il semblerait qu'une évolution minéralogique d'origine naturelle (non perturbée par le gonflement sous le lotissement) soit en cours, au vu de la réalimentation aisée du piézomètre lors du pompage qui indique des circulations d'eau facilitées. Elles se produiraient certainement à la faveur de fractures, qui sont nombreuses en profondeur.

Si l'hypothèse d'une zone gonflée naturellement est juste, comme mis en évidence sur SC7, il est probable qu'une zone gonflée préexistait également sur les forages du lotissement avant le forage géothermique. Toutefois les transformations se produisaient extrêmement lentement, du fait des circulations d'eau très lentes, et la surrection n'était pas ressentie à l'échelle humaine.

Les observations minéralogiques ont conduit E. Pimentel à proposer de scinder en deux zones distinctes la zone intègre qui avait été proposée par GEODERIS dans le rapport projet. Il résulte que les terrains qui composent le sous-sol à Lochwiller sont scindés en trois zones, en fonction de leur potentiel de gonflement :

- une zone altérée qui correspond à une couche où la transformation de l'anhydrite est complètement terminée, et où le gypse a été totalement dissous par les circulations des eaux d'infiltration (« *leached section* ») ;
- une zone gonflée (« *fully swollen section* ») où la transformation de l'anhydrite en gypse est terminée, mais où le gypse est toujours présent. Cette transformation a pu commencer naturellement avec l'infiltration d'eau depuis l'aquifère de la zone altérée, toutefois elle s'est certainement largement intensifiée avec les arrivées d'eau du forage géothermique ;
- une zone intègre (« *unaltered Gipskeuper* »), où il reste de l'anhydrite intacte.

L'Annexe 8 et la Figure 55 ci-dessus présentent la répartition de ces trois zones sur les quatre forages.

Par ailleurs, les smectites apparaissent comme les argiles majoritaires (environ 50%) dans le sous-sol. Ce sont des argiles gonflantes. En seconde position vient l'illite, sur un quart à un tiers du volume de la phase argileuse. De la chlorite apparaît enfin, sur 10 ou 20% du total de cette phase. La répartition de chaque argile au sein de la phase argileuse ne semble pas évoluer avec la profondeur.

Ensuite, du quartz est observé sur l'ensemble des échantillons analysés, à des proportions comprises entre 0,1% et 46%, et en moyenne de 5 à 20%. Aucun faciès sableux ou gréseux n'ayant été observé sur les carottes, il s'avère que le quartz constitue la fraction silteuse présente dans les argilites.

Les carbonates présents sont la dolomite, la calcite et la magnésite, sur l'ensemble des échantillons, dans des proportions très variables. Ils présentent une très fine granulométrie, et sont liés aux phases argileuses pour composer les marnes, qui sont donc plus ou moins calcaires, dolomitiques ou à tendance magnésienne. Ces carbonates donnent aux terrains des caractères plus massifs, ayant moins tendance au délitement que les terrains plus argileux. La part des carbonates est relativement faible en zone intègre (10-20% généralement), et plus importante en zone altérée (40-60% généralement), certainement du fait de la disparition des évaporites.

- Hydrogéologie

Un aquifère libre est situé dans les argilites à gypse du Keuper. Sa surface piézométrique vers 209-210 m NGF) s'établit à la base de la zone altérée, l'aquifère est donc situé dans la zone gonflée, peut-être dans le sommet de la zone intègre. Il s'agit d'un aquifère qui a été nommé « aquifère actuel », par opposition à l'aquifère « historique » qui s'était développé dans la zone altérée et qui a conduit au lessivage de la quasi-totalité des évaporites. La déstructuration des terrains consécutives aux arrivées d'eau du forage géothermique et au gonflement consécutif a, en quelque sorte, fait descendre l'aquifère dans des couches plus profondes riches en anhydrite.

Dans le verger situé au-dessus du lotissement, les eaux captées mettent en évidence un aquifère à caractère captif. Ceci provient du confinement sous une forte épaisseur de terrains par des couches imperméables. Il apparaît en effet que le niveau d'eau dans le forage SC7 est beaucoup plus élevé en altitude (223 m NGF) que dans les autres ouvrages (autour de 209-210 m NGF). Il est probable que ce niveau aquifère soit connecté à la nappe qui s'est développée au droit du lotissement Weingarten autour de 209-210 m NGF.

Les trois puits privés captent également le Keuper, toutefois il semble s'agir d'une zone altérée qui serait présente en pied de versant, jusqu'à 7-8 m de profondeur (203,5 m NGF). Dans le puits communal, l'eau se situe autour de 210 m NGF. Dans les deux autres puits privés, elle se stabilise autour de 208,4 m NGF.

Une esquisse de carte piézométrique a été proposée. Il a été choisi de connecter les niveaux d'eau des puits privés situés en pied de versant avec ceux mesurés dans les forages au droit de la colline. L'écoulement suivrait globalement la topographie avec une partie d'aquifère captive en amont, et libre en aval. Il est difficile de savoir s'il s'agit bien d'un seul et même aquifère, ou si les deux secteurs sont déconnectés, et jusqu'où. Il sera vu plus loin que les eaux souterraines du coteau alimentent le puits Schorr, lui conférant un faciès hydrogéochimique différent de celui des autres puits.

La surface de la nappe est parfois plus haute dans le forage SC4 que dans le forage SC5. Il pourrait s'agir d'une perturbation occasionnée par des arrivées d'eau provenant du Muschelkalk captif via le forage géothermique.

Les difficultés rencontrées pour purger les piézomètres SC4 et SC6-2, et au contraire l'excellente réalimentation des piézomètres SC5 et SC7, témoignent de circulations d'eaux localisées, très probablement à la faveur de fractures ou de niveaux sédimentaires rendus perméables, suite à des dissolutions de minéraux sulfatés.

▪ Température et conductivité des eaux souterraines

Des diagraphies de température et de conductivité électrique des eaux souterraines ont été effectuées en mai 2016. Il est rappelé que la transformation de l'anhydrite en gypse est un phénomène exothermique, c'est-à-dire qu'il dégage de la chaleur, qui peut être détectée dans les eaux. Les profils de température apparaissent à l'usage un excellent moyen pour identifier les zones où les phénomènes exothermiques d'hydratation de l'anhydrite sont actifs. Les informations obtenues sont synthétisées ci-dessous :

- Les forages SC4 et SC5 sont incontestablement le siège des phénomènes les plus intenses car les températures y sont les plus élevées et les gradients thermiques nettement affectés.
- Le profil en SC4, le plus régulier, suggère une zone affectée par un gonflement relativement intense et assez homogène (tranche 205-210 m NGF) développé surtout à la partie supérieure de la nappe (13-13,5°C), dans la zone gonflée. La forte conductivité électrique est cohérente avec la présence d'eau du Muschelkalk très chargée en chlorure, mais peu aussi mettre en évidence en sus la forte composante sulfatée calcique des eaux.
- Le profil en SC5 indiquerait un gonflement actif sur toute la hauteur d'eau mais surtout en profondeur (tranche supérieure 205-210 m NGF autour de 13-14°C dans la zone gonflée, tranche inférieure située en zone intègre 199-205 m NGF atteignant 16°C). Le gradient de température est de 26°C/100 m, ce qui est extrêmement élevé. La conductivité électrique également plus élevée en profondeur pourrait être l'indicateur d'une plus forte proportion d'eau du Muschelkalk.
- Le profil en SC6 montre dans sa partie inférieure un gradient thermique d'orientation normale mais de 8°C pour 100 m, ce qui apparaît particulièrement élevé. La tranche concernée, en zone gonflée, et en zone intègre dans le fond, est 194-210 m NGF avec des températures de 12°C environ. Les eaux sont moins chaudes que dans le forage SC4 et le forage SC5, ce qui va dans le sens d'une intensité de gonflement légèrement moindre.
- Le profil en SC7 révèle des températures basses avec un gradient thermique faible (2,3 °C/100 m, cohérent avec le gradient géothermique moyen sur Terre : 3°C/100 m). Les températures sont de l'ordre de 11,5°C. Notre interprétation est qu'il s'agit ici d'une zone faiblement active reflétant le processus naturel d'hydratation des évaporites sous l'effet de la lente infiltration des pluies et des circulations souterraines au sein de la formation en évolution. Le fait que le piézomètre soit bien réalimenté indique que des écoulements sont bien présents.

Globalement, les températures relevées dans les eaux des forages SC4, SC5 et SC6-2 croissent avec la profondeur. Du point de vue minéralogique, il a été vu plus haut que l'anhydrite est quasiment absente au sommet de la zone non altérée, ayant fait place au gypse depuis le début des arrivées d'eau produites dans cette zone via le forage géothermique et les eaux d'infiltration ensuite. Cette zone a été nommée zone gonflée. Le gonflement serait quasiment achevé sur la tranche 205-211 m NGF recoupée par SC5 et SC6, et sur la tranche <197-210 m NGF recoupée par SC4. L'anhydrite apparaît alors plus en profondeur, dans la zone intègre, à parts variables mais globalement équivalentes à

celles du gypse, indiquant un gonflement qui serait en cours de propagation vers la profondeur. Cette interprétation va dans le sens de températures des eaux croissantes avec la profondeur.

- Hydrochimie

L'examen des résultats des analyses d'eaux indiquent tout d'abord que la conductivité électrique des eaux des piézomètres se trouve très supérieure (2260 à 7610  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) à celle des puits privés (1240 à 1950  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), même si cette dernière se trouve dans une gamme assez élevée. Les puits privés captent l'eau présente dans la zone altérée du Keuper, et non une nappe alluviale, ce qui explique cette minéralisation. Au droit du lotissement, la conductivité électrique des eaux du forage SC4 est très supérieure à celle des autres forages (SC4 : 7610  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , SC5 : 4170  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , SC6 : 2260  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , SC7 : 3210  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), lui conférant ainsi une particularité, qui sera également mise en évidence sur les analyses chimiques.

Ensuite, il ressort de manière évidente que le contexte géochimique des différentes composantes de l'hydrosystème est hétérogène spatialement. Globalement les faciès affichés par les eaux sont à tendance chlorurée et sulfatée, calcique et magnésienne, en particulier pour les piézomètres, le puits Schorr et le ruisseau. La richesse des eaux en sulfates et en calcium provient du contact avec l'anhydrite et le gypse, ces minéraux sont solubles et en cours de transformations minéralogiques. Le piézomètre SC4 présente les concentrations les plus élevées en calcium (526 mg/l), magnésium (244 mg/l), sodium (984 mg/l), potassium (42,2 mg/l), chlorures (999 mg/l) et sulfates (2580 mg/l). Les eaux du forage SC5 présentent le même faciès que celles du forage SC4, toutefois plus dilués, notamment en sodium (293 mg/l) et potassium (22,8 mg/l), en chlorures (266 mg/l) et en sulfates (2000 mg/l). Les eaux des forages SC6-2 et SC7 apparaissent dans les mêmes gammes de concentrations en calcium et magnésium, mais dans des gammes moins concentrées en sodium et potassium, et en chlorures. Les eaux du forage SC6 contiennent moins de calcium (327 mg/l) et de sulfates (923 mg/l) que celles de SC7 (503 mg/l et 1840 mg/l respectivement), probablement du fait d'un apport d'eaux moins minéralisées issues du pied de versant (secteur du puits communal) et de la « jeunesse » relative de l'aquifère au regard du retard du début de gonflement.

Le puits Schorr semble subir une influence des eaux souterraines du coteau, le faciès de ses eaux étant celui qui se rapproche le plus des eaux des piézomètres, du point de vue du calcium (323 mg/l), du magnésium (88 mg/l), et des sulfates (808 mg/l). Cela indique un mélange avec des eaux issues de l'aquifère développé au droit de la colline. Cela appuie la carte piézométrique proposée. Le puits communal et le puits Matjeka se détachent nettement des autres ouvrages cités, montrant un faciès davantage carbonaté/bicarbonaté et chloruré plutôt que sulfaté. Le puits Matjeka présente les concentrations les plus faibles en calcium (81 mg/l), en magnésium (35 mg/l), et en sulfates (51 mg/l), de même que le puits communal. En revanche, leurs teneurs en sodium, potassium, nitrates et chlorures ne sont pas négligeables, ce qui pourrait traduire une influence du forage géothermique et du salage de la chaussée en hiver (sodium et chlorures) et de l'utilisation d'engrais dans les jardins potagers proches (nitrates et potassium).

Il apparaît donc que les eaux des quatre forages sont riches en sulfates et en calcium, ces éléments minéraux étant issus de la dissolution des évaporites présentes aux mêmes niveaux que les crépines des piézomètres. Les forages SC4 et dans une moindre mesure SC5, présentent une composante supplémentaire chlorurée, sodique et potassique. Pour les chlorures et le sodium, il semble qu'ils proviennent d'un mélange avec des eaux plus profondes, remontées du Muschelkalk captif via le forage géothermique fuyard. Ce qui est curieux, c'est que les analyses antérieures (celles du BRGM en 2008 sur les eaux infiltrées

sur la propriété Schorr, et celles de PLUME sur le PZ1 distant de quelques mètres du SC4), n'en contiennent que très peu. La salinité du Muschelkalk demanderait à être vérifiée.

Les teneurs en potassium sont plus difficiles à interpréter, cet élément étant largement présent dans les engrais et pouvant être apporté par les eaux superficielles. La teneur en nitrates des eaux du SC4, très faible au regard de celles des autres ouvrages, l'individualise également, et semble mettre en évidence l'origine plutôt souterraine des eaux, au regard d'une composante plus superficielle des autres eaux, les nitrates ayant pour origine les engrais utilisés en agriculture. L'absence de nitrates sur SC4 va dans le sens d'une origine profonde du potassium présent dans ses eaux.

Le ruisseau Dachsgaben qui collecte l'ensemble des eaux superficielles comme souterraines, représente une moyenne des eaux de l'hydrosystème et caractérise ainsi le fond géochimique local. Il montre un faciès bicarbonaté calcique, classique, avec très peu de chlorure et de sodium. Le contenu en nitrate normal en milieu agricole atteste d'une dilution par les eaux de pluie.

- Datation des eaux

L'analyse des gaz dissous (CFC et SF6) sur les eaux de SC4 donne des résultats plutôt caractéristiques d'un mélange d'eaux anciennes (30-40 ans, selon teneurs en CFC) et d'eaux plus récentes (la teneur en SF6 indique une concentration caractéristique de 2010). Il n'est pas possible de connaître plus précisément l'origine des eaux « anciennes » : Muschelkalk captif ou eaux du Keuper infiltrées plus en amont, sur la colline.

Les analyses effectuées sur les eaux du forage SC5 fournissent des âges non cohérents, autour de 35-40 ans, mais avec du CFC12 en excès. Il s'agirait selon le laboratoire d'un mélange complexe d'eaux d'âges différents.

Sur les eaux du forage SC6-2, les âges obtenus sont d'environ 35 ans, si l'on considère un modèle piston. Si l'on considère un modèle binaire, ce qui est plus probable, le laboratoire l'interprète comme un mélange de 20-40% d'eau récente, avec une eau infiltrée il y a 40-45 ans. Cette dernière pourrait être issue du forage géothermique, toutefois les analyses chimiques n'indiquent pas un faciès à tendance chlorurée-sodique comme sur les eaux de SC4. Il pourrait s'agir plutôt de circulations lentes issues de l'infiltration plus haut sur la colline, qui se produisent au sein du Keuper (secteur SC7 et plus haut). Cela est confirmé par les résultats sur les eaux du piézomètre SC7, qui indiquent des eaux plus anciennes que les précédentes, 40-45 ans pour un modèle piston, >200 ans pour un modèle à recharge continue, et dans le cas d'un modèle binaire, il s'agirait d'une eau de 40 ans ou plus mélangée 10-20% d'eau récente.

Les résultats sur le puits Schorr indiquent un âge d'environ 40 ans, sauf pour le SF6 qui indique une infiltration vers 2005. Il s'agirait selon le laboratoire d'un mélange complexe d'eaux d'âge différent.

Enfin, les analyses effectuées sur les eaux du puits communal ne sont pas interprétables.

- Recalage de la série sédimentaire

L'observation du Zellenkalk dans le forage SC7 à 230,7 m NGF permet de placer à peu près la limite entre les Couches à pseudomorphoses de sel (le Zellenkalk serait, au vu de la carte géologique, situé à la base du premier dixième des Couches à pseudomorphoses de sel), et les Marnes irisées inférieures, au-dessus des premières. L'épaisseur des Marnes à pseudomorphoses de sel est annoncée dans la notice de la carte géologique comme atteignant de l'ordre de 80 m. Le Zellenkalk serait donc situé à 8 m environ sous le toit des Marnes à pseudomorphoses, et 72 m au-dessus de la base du Keuper. Un calcul géométrique permet ainsi de localiser la base du Keuper à 158,7 m NGF au droit du forage SC7, et à 172,0 m NGF au droit du forage SC4, soit à 48 m de profondeur environ (Figure 56). La Lettenkohle n'aurait donc pas été atteinte par le forage SC4 (43,4 m de profondeur) à environ 5 m près.

En vue de corrélérer les descriptions géologiques faites par l'entreprise en charge du forage géothermique, qui indiquait pour celui-ci des marnes et des calcaires durs gris de 18 à 58 m, puis des calcaires durs, gris, puis blancs de 58 à 140 m [35], on peut concevoir les choses de cette manière : la base du Keuper serait située à 48 m au droit du forage géothermique et aurait presque été atteinte par le forage SC4. La Lettenkohle aurait donc été incluse dans la description de l'ensemble des dépôts compris entre 18 m et 58 m, et présenterait une épaisseur plus faible que ce qui est annoncé dans la notice de la carte géologique, plutôt 10 m que 22-28 m. Le Muschelkalk débiterait ensuite à 58 m, hypothèse qui avait été retenue jusqu'à présent par différents rapports, dont celui de GEODERIS [1].

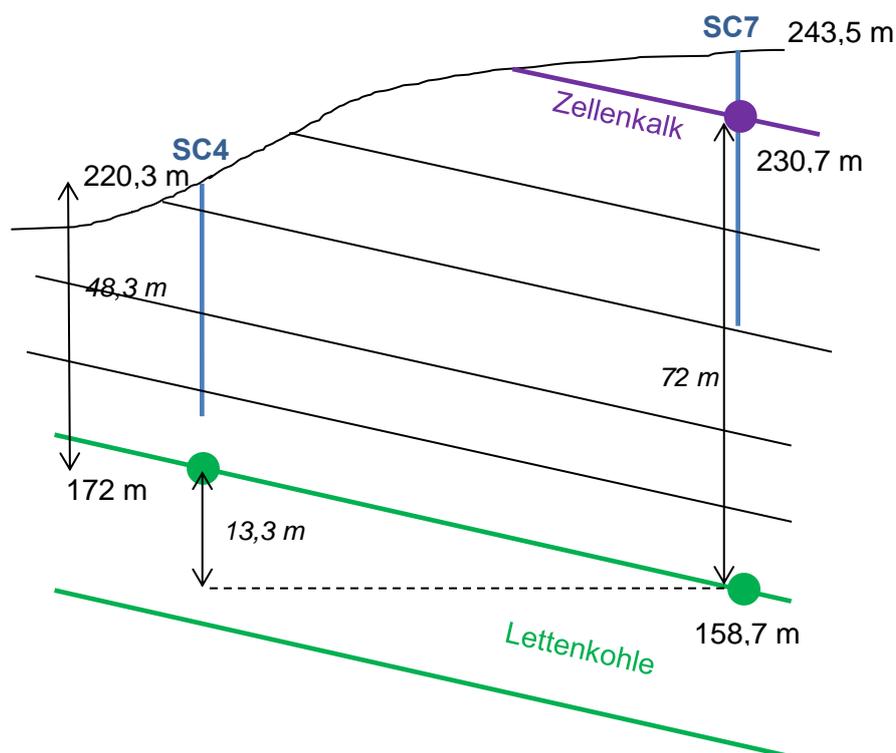


Figure 56 – Représentation schématique du calcul de positionnement de la Lettenkohle

- Reconstitution de l'historique des désordres

Un aquifère « historique » existait dans l'actuelle zone altérée, résultant d'infiltrations d'eaux de surface. E. Pimentel précise que cette zone altérée, qui n'est plus composée que d'argiles, s'est formée sous la surface et a constitué une couche protectrice contre un lessivage plus profond et un gonflement. Cette couche est actuellement endommagée par le gonflement (présence de crevasses verticales).

Nous pensons que les terrains situés sous la zone altérée (inférieurs à 211,8 m NGF au droit de SC4, qui est situé à quelques mètres du forage géothermique), n'étaient pas le siège de circulations d'eau, ou éventuellement très faibles, jusqu'au milieu des années 2000, et qu'ils ont été perturbés par les arrivées d'eaux d'origine profonde issues du forage géothermique. **Cette hypothèse a été validée par E. Pimentel, qui estime que c'est la seule cause possible au sinistre.** Les eaux souterraines du Muschelkalk, d'après les informations obtenues, seraient remontées jusqu'à une profondeur de 11,6 m le lendemain de la foration soit une altitude de 208,9 m NGF<sup>13</sup>. Une autre mesure fait état d'un niveau d'eau à -9 m en juin 2008 (rapport BRGM de 2008 [35]), lors des tentatives de rebouchage du forage géothermique, soit une altitude de 211,5 m NGF. Il n'est pas certain qu'il s'agisse bien d'une charge hydraulique représentative de celle d'un aquifère, toutefois c'est probable, ce qui expliquerait l'inondation provoquée au pied de la grande de la propriété Schorr (la cote des terrains se trouve autour de 211,3 m NGF).

Suite à l'inondation, qui a duré six mois, de multiples tentatives de rebouchage du forage ont été engagées. Elles ont présenté l'inconvénient de boucher le forage en subsurface, laissant la totalité du linéaire de forage plein d'eau sous pression, depuis le Muschelkalk.

Les eaux imprégnant le forage géothermique mal cimenté en profondeur ont circulé dans la zone intègre du Keuper sous la cote 208,9 m NGF, imprégnant les terrains qui constituaient la base de l'aquifère « historique » développé entre 211,8 m NGF et la surface du sol. Les bancs d'anhydrite situés en proximité immédiate du forage géothermique se sont alors mis à gonfler, *a priori* entre 208,9 m NGF (niveau d'eau du Muschelkalk captif) et 202-203 m NGF, base estimée de l'aquifère « actuel ». Des déstructurations des terrains sont apparues suite au gonflement, par apparition de fractures, de décollements des lamines d'argiles et d'anhydrite, favorisant ainsi des circulations d'eaux de plus en plus importantes, au fur et à mesure que le front de gonflement s'étendait sur tout le pourtour du forage. Comme cela avait été supposé dans l'avis rendu en 2014 [1], le pendage géologique des couches (nord-nord-est) a pu orienter le front de gonflement de manière préférentielle dans cette direction. Toutefois, un autre scénario est plus probable. Le gonflement initié dans la tranche 202-203 m / 208,9 m a généré des désordres en subsurface et en surface, après quelques mois ou plutôt quelques années. Ce délai, à notre avis, provient du fait de la faible conductivité hydraulique des terrains préalablement secs, et de la cinétique de la réaction de gonflement de l'anhydrite<sup>14</sup>. Ces désordres ont compris des ruptures de canalisations répétées, réparées par la mairie à plusieurs reprises. Un réseau d'évacuation des eaux pluviales est présent à quelques mètres du forage géothermique. À proximité de la maison Kandel, il comprend un bassin d'orages profond de 5,20 m. Nous pensons que l'épicentre du gonflement est situé au droit du réseau d'eau, du fait que celui-ci s'est rompu et a apporté, dans ce second temps, davantage d'eaux que le forage géothermique déclencheur du sinistre. Nous concluons que le réseau n'est pas responsable du déclenchement du sinistre, comme cela a été supposé par plusieurs experts, tout simplement parce que la profondeur du bassin d'orage (5,20 m à

---

<sup>13</sup> Les altitudes du sol n'étant pas constantes dans le temps, nous avons retenu la cote fournie par Plume en 2013 pour Pz1 [21] : 220,5 m NGF.

<sup>14</sup> Il sera vu plus loin au § 7.4.2 que les essais en laboratoire ont fourni un gonflement de seulement 0,46% en 4 mois (à la place des 31% attendus, calculés sur la composition minéralogique de l'échantillon SC4-7).

côté de la maison Kandel soit environ 215,3 m NGF) n'atteint pas la base de la zone altérée, qui se situe à 208,9 m NGF près de la maison Kandel, et à 208,45 m NGF dans le forage SC5, entre la maison Sutter-Brechenmacher et la maison Borowiak-Cromer. Les anhydrites de la zone intègre, sans le forage géothermique, n'auraient pas pu être mises en contact avec de l'eau. Sept mètres d'argiles les sépare du réseau pluvial (cela est bien visible sur la Figure 57 ci-après, qui est à l'échelle).

L'aquifère se serait donc déplacé en profondeur, reproduisant le processus décrit ci-dessus d'hydratation de l'anhydrite en gypse, cette fois à une vitesse bien supérieure du fait des fortes arrivées d'eau sous pression issues du forage et des infiltrations des eaux météoriques.

- Synthèse des informations géologiques et hydrogéologiques et relatives au gonflement, obtenues

Les deux figures ci-dessous constituent des coupes géologiques et hydrogéologiques. Elles présentent l'agencement dans l'espace de la zone altérée, de la zone gonflée et de la zone intègre, des couches de minéralogies différentes, des niveaux d'eau dans le Keuper, de l'intensité du gonflement et de ses limites supposées (attention à l'exagération verticale de 2x).

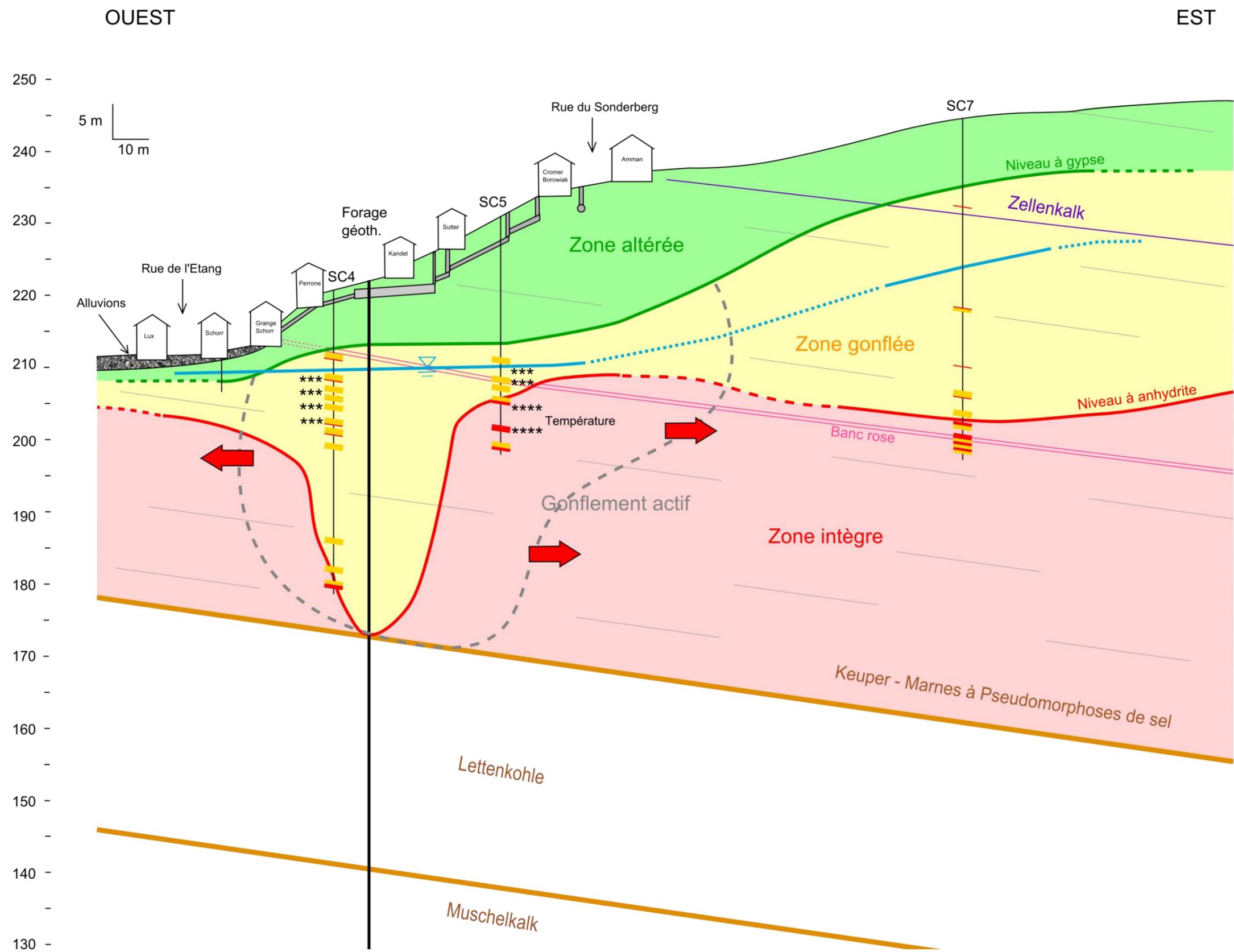


Figure 57 – Coupe géologique et hydrogéologique ouest-est - Extension supposée du gonflement



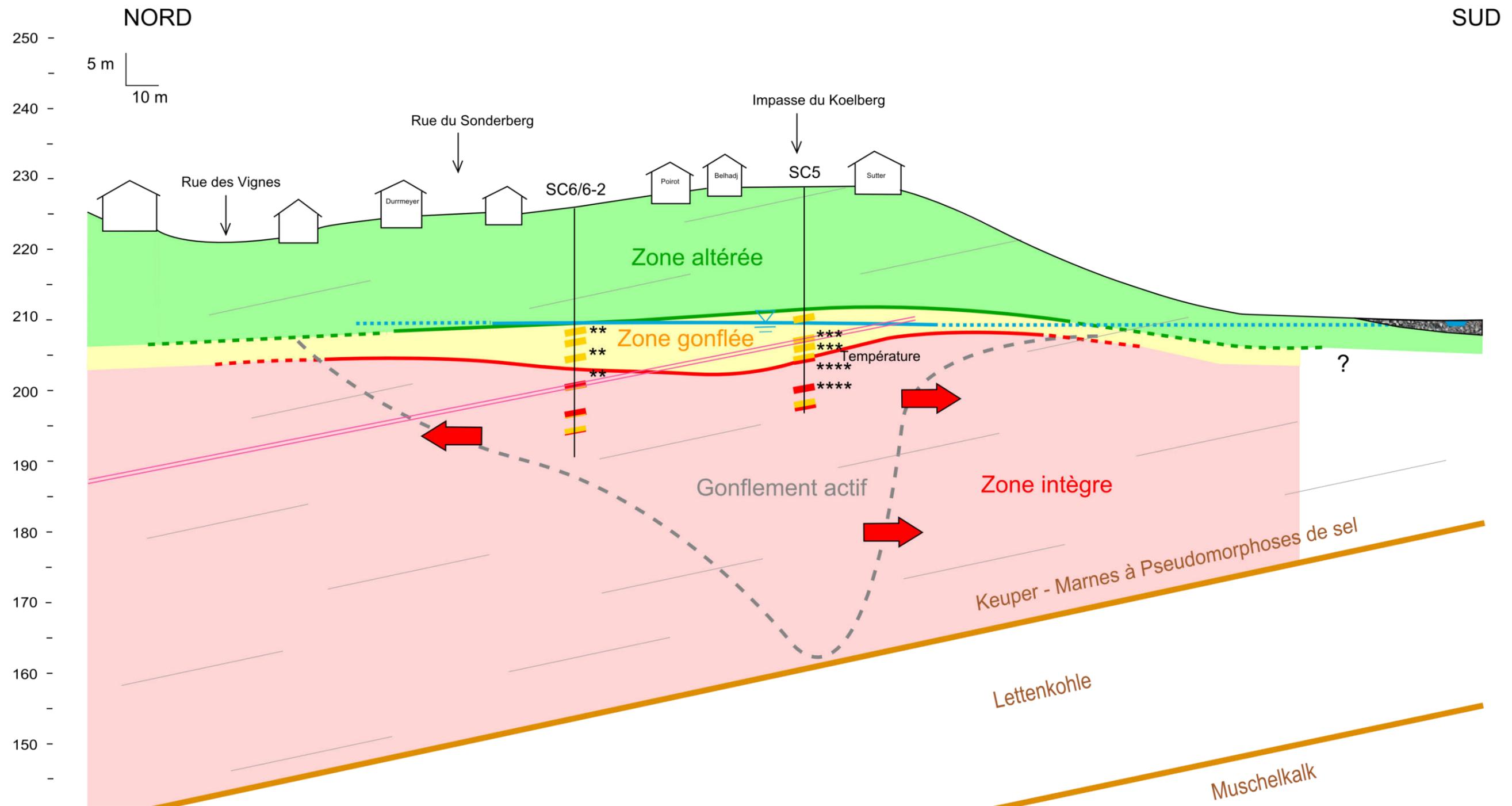


Figure 58 – Coupe géologique et hydrogéologique nord-sud - Extension supposée du gonflement

## 8.2 Synthèse des informations géotechniques

- Caractérisation des propriétés des terrains

Les indices de plasticité calculés à l'aide des limites d'Atterberg indiquent des terrains faiblement à moyennement plastiques. Les indices de consistance, quant à eux, montrent des terrains très consistants. Reportés sur le diagramme de Casagrande, modifié par Dakshanamurphy et Raman, les sols de Lochwiller, du point de vue de leurs composants argileux uniquement (les minéraux sulfatés ne sont pas pris en considération), sont classifiés dans les limons peu plastiques, avec un potentiel de gonflement moyen.

Les valeurs de bleu indiquent par ailleurs des sols limoneux peu plastiques à moyennement plastiques. La sensibilité des sols au retrait-gonflement des terrains d'après [31] serait faible à moyenne.

Ces informations sont obtenues à l'aide de moyens semi-empiriques, c'est pourquoi des essais de gonflement, fournissant des quantifications plus précises, ont été demandés.

- Essais œdométriques et difficultés de prévisions de surrection

Le comportement gonflant par hydratation (d'anhydrite et/ou d'argiles) des sols et des roches peut être testé en laboratoire par des essais de gonflement, encore appelés essais œdométriques. Ils consistent en l'introduction d'un échantillon rocheux sélectionné et taillé sous forme cylindrique dans un œdomètre. Il s'agit d'une cellule qui permet uniquement la déformation axiale. La contrainte axiale exercée sur l'échantillon correspond à celle appliquée sur les roches testées par les terrains de recouvrement. Une pression interstitielle est maintenue stable tout au long de l'essai, à l'aide de deux injecteurs, situés aux deux extrémités de l'éprouvette. Le fluide injecté est de l'eau recueillie sur site.

Le déplacement axial, provoqué par le gonflement, est mesuré, jusqu'à atteindre une valeur stable signifiant l'arrêt du phénomène. Une contrainte supplémentaire est alors appliquée à l'échantillon jusqu'à lui faire retrouver son volume initial avant gonflement. Il s'agit du potentiel de gonflement, exprimé en MPa. Des analyses minéralogiques sont réalisées avant et après gonflement sur chaque échantillon.

Cinq échantillons ont été testés : deux sur SC4, un sur SC5, un sur SC6, et un sur SC7. Les analyses minéralogiques ont montré la présence d'anhydrite et de gypse sur 3 échantillons parmi les 5, un échantillon prélevé sur SC4 et celui prélevé sur SC6 ne contiennent que du gypse. Il n'est en effet pas possible de distinguer à l'œil nu les différents minéraux, et le prélèvement s'est fait « à l'aveugle ».

Le potentiel de gonflement mesuré pour les 5 échantillons oscille entre 1,13 MPa et 1,50 MPa. Les gonflements obtenus sont très incomplets, au regard des teneurs en anhydrite initiales, et surtout au vu des teneurs en anhydrite finales. Seul quelques % au mieux ont été transformés en gypse. GeoRessources estime que la cinétique d'hydratation est très lente, et que les pressions de gonflement maximales n'ont pas été atteintes.

Les échantillons SC4-7, SC5-18 et SC7-16 ont montré un gonflement de faible amplitude (respectivement 0,46%, 0,22% et 0,08%), au regard du gonflement théorique (en admettant un gonflement de 62% pour l'anhydrite) de 15%, 11% et 29%.

Les essais de gonflement réalisés ont pour objectif de tenter de relier l'intensité de la surrection à l'intensité du gonflement des matériaux présents dans le sous-sol, afin d'évaluer l'intensité du gonflement restant à survenir. Quelques calculs simples ont montré que selon la porosité initiale de l'échantillon, le gonflement peut être optimum aussi bien que nul, si

cette dernière est très importante et que le gypse a la place pour cristalliser. Les calculs ont simplement pour but de montrer combien il est difficile d'appréhender par des essais de laboratoire des valeurs de gonflement et des cinétiques applicables sur le terrain. Ils n'ont pas considéré la présence d'une phase argileuse gonflante, ni l'apparition de fissures qui peuvent contribuer à l'augmentation du volume rocheux. E. Pimentel a en effet montré que l'augmentation volumique d'un échantillon rocheux riche en anhydrite et en présence d'eau provient également, par la cristallisation du gypse, de la fissuration de l'échantillon (concept de « *cracking* »).

De même, E. Pimentel a précisé qu'il est, comme nous le pensions, très hasardeux d'extrapoler les résultats d'essais en laboratoire aux phénomènes in situ, en termes de cinétique et d'amplitude, car les conditions hydrogéologiques sont très différentes sur le terrain, les couches à évaporites sont très hétérogènes, etc. Dans son expertise, il a précisé qu'il n'est pas possible de prédire les taux de gonflement des roches basées uniquement sur leur composition minéralogique, et qu'il n'est, par ailleurs, pas possible de définir une pression de gonflement maximale par des essais œdométriques tels qu'ils ont été proposés par GeoRessources. Selon lui, l'application d'une charge pour faire revenir l'échantillon à son volume initial ne peut avoir de résultats fiables que si le processus est réversible, soit sur un matériau à comportement élastique. Cela n'est pas le cas d'un échantillon rocheux qui gonfle et se fissure sous l'effet de la précipitation du gypse. Il aurait fallu, pour obtenir une pression de gonflement maximum, réaliser des tests sous conditions complètement contraintes [18].

**E. Pimentel précise que l'extrapolation de résultats d'essais de gonflement en laboratoire à l'échelle du milieu rocheux en place est un problème qui n'est pas résolu à l'heure actuelle, notamment en termes d'interprétation des contraintes de gonflement maximum, des taux de gonflement aussi bien que du développement des processus en termes de cinétique (effet d'échelle). Comme vu ci-avant, la raison de ces incertitudes peut être attribuée, entre autres, à l'hétérogénéité naturelle du Keuper à gypse avant gonflement, à la formation de fissures, et aux changements dans les conditions de circulation et dans la composition chimique des eaux souterraines.**

**De ce fait, il affirme qu'il n'est pas possible de prévoir l'évolution des processus de gonflement dans le temps, aussi bien que l'effet de mesures d'atténuation, même si l'on effectuait des essais œdométriques dans des conditions mieux adaptées. Une extrapolation des résultats acquis par des mesures *in situ* permettrait seulement une estimation du comportement à prévoir dans un futur proche, en termes de soulèvement.**

Quoi qu'il en soit, selon le graphique fourni dans l'article de Sass et Burbaum [15], et qui présente les domaines de gonflement de l'anhydrite dans un sous-sol, au regard de la contrainte exercée par les terrains de recouvrement, le poids des terrains ne peut s'opposer au gonflement de l'anhydrite qu'à partir de 61 m d'épaisseur. Ce n'est pas le cas à Lochwiller. Ici, le gonflement, reconnu entre 180-203 m NGF et 211 m NGF *grosso modo*, est profond au maximum de 9 m au droit de la maison Schorr, et de 30 m environ au droit de la maison Amman. Cela est validé par E. Pimentel, qui précise que les contraintes de gonflement maximum à attendre dans le Keuper à gypse dépassent la contrainte exercée par la couverture (environ 1 MPa pour 40 m).

- Mouvements de terrain en jeu

Les mesures de déplacement mettent en évidence que la partie supérieure du lotissement subit un déplacement vertical très important, ainsi que des déplacements horizontaux. Selon E. Pimentel, ces déplacements horizontaux peuvent avoir plusieurs causes possibles : (1) la couche d'anhydrite ne gonfle pas uniformément mais plus à certains endroits que d'autres, (2) si la contrainte horizontale est plus faible ou similaire à la contrainte verticale, le

gonflement peut aussi bien se produire dans une direction horizontale, (3) le soulèvement horizontal peut provoquer un glissement des couches supérieures de la pente. Un tel glissement peut provoquer une pression latérale sur des habitations adossées à la pente.

Du fait du soulèvement non uniforme, en combinaison avec les déplacements horizontaux susmentionnés, des crevasses apparaissent, qui permettent à l'eau de pluie de s'infiltrer à la fois dans les couches supérieures (ce qui ramollit les sols et peut provoquer ou accélérer des glissements de terrain), et dans le Keuper plus profond. Le ramollissement des sols augmente la pression latérale sur les maisons, spécialement à l'occasion d'épisodes pluviométriques intenses, ce qui, ainsi, provoque des dommages supplémentaires sur certaines habitations. Cela peut affecter les maisons les plus anciennes en pied de pente (Schorr, Schellinger, Schmitz). Les infiltrations en profondeur accélèrent le gonflement dans la zone intègre. Cela pourrait expliquer la relation entre la pluviométrie et le taux de déformation mis en évidence en 2014 [1] : l'infiltration de la pluie provoque le glissement des couches et accélère le gonflement de l'anhydrite.

E. Pimentel attire l'attention sur le fait que ces phénomènes ne peuvent être suivis et identifiés par les seules mesures de déplacement en surface. La seule façon de caractériser un mécanisme actif est la mesure de la déformation du sous-sol en profondeur.

### **8.3 Prévision de poursuite de la surrection des sols**

Il a été vu plus haut que l'évolution d'un gonflement d'anhydrite ne pouvait être appréhendée, en termes de cinétique et d'amplitude, par des essais en laboratoire. Cela tient, entre autres, à l'hétérogénéité naturelle du Keuper à gypse avant gonflement en termes de minéralogie, ou encore de porosité, de perméabilité, à la formation de fissures, et aux changements dans les conditions de circulation et dans la composition chimique des eaux souterraines.

La présence d'une zone gonflée à Lochwiller, où la quasi-totalité de l'anhydrite est d'ores et déjà transformée en gypse, montre que, sur une certaine épaisseur de terrains, sous la zone altérée, le gonflement est en voie d'achèvement. De la dissolution de gypse peut se produire, c'est peut-être déjà le cas, car ces terrains sont le siège de circulations d'eaux souterraines (aquifère actuel). Dans ce cas, un tassement serait à attendre.

Par ailleurs, il a été mis en évidence que de l'anhydrite est encore présente sous la zone gonflée, dans ce que l'on a appelé la zone intègre. Cette zone intègre, d'après l'accroissement de température avec la profondeur mesurée dans les piézomètres, et la présence de gypse secondaire semble, elle, en cours de gonflement. Ce gonflement se propage certainement horizontalement, à partir du forage géothermique fuyard.

Cela tend à recommander une nouvelle fois un bouchage au plus tôt du forage géothermique, ainsi que des arrivées d'eaux superficielles. Au droit du verger communal, à l'est du lotissement, le gonflement ne semble pas s'être propagé, même si du gypse est présent en profondeur. Une incertitude persiste et demande à être levée.

Concernant l'extension spatiale du phénomène, nous estimons qu'il est probable qu'il s'étende dans toutes les directions autour du lotissement, étant donné que le pendage des couches à anhydrite est faible, et que les transformations minéralogiques se propagent au sein des bancs, même à l'encontre du gradient hydraulique. Cela augmente leur perméabilité, favorisant la circulation des eaux, et auto-entretenant le phénomène. La carte géologique montre que la base du Keuper, donc la limite inférieure des couches à anhydrite, se situe bien au-delà du village. En conséquence, il n'est pas possible de prédire un arrêt de la propagation du gonflement, ni, pour le moment, de cartographier des secteurs où l'on serait sûr qu'il restera stable. La profondeur de la zone altérée n'est pas connue au droit du

vieux village, en dehors de la propriété Matjeka, où elle est profonde de 7,5 m. Aussi, il pourrait être envisagé, si la zone altérée s'approfondit vers l'ouest, qu'elle arrêtera le gonflement (Figure 59). Seuls des forages pourront fournir une cartographie en trois dimensions de cette zone altérée, et des niveaux d'eaux au sein de la nappe du Keuper.

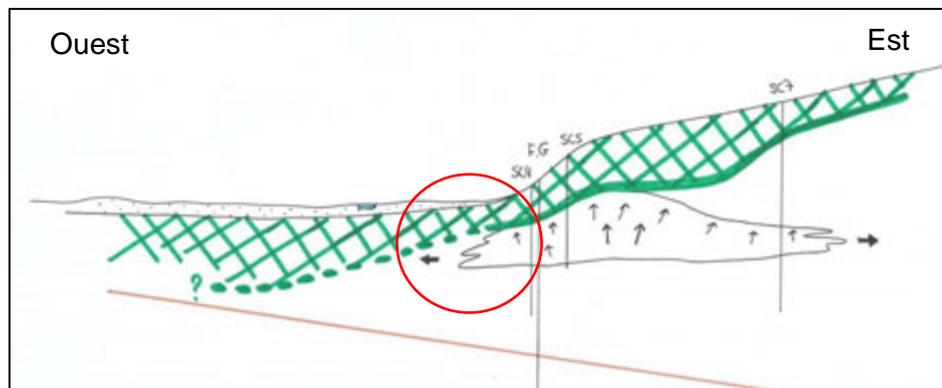


Figure 59 – Schéma de principe de l'arrêt possible du gonflement par la zone altérée si celle-ci est suffisamment profonde (Attention : échelles non respectées)

### Avis d'E. Pimentel sur la poursuite de la surrection

Concernant la poursuite du gonflement au droit du lotissement, E. Pimentel s'exprime ainsi : l'arrêt complet du gonflement ne peut être envisagé que dans les conditions suivantes : soit quand le potentiel de gonflement des terrains sera complètement épuisé, soit quand l'aquifère actuel ne sera plus alimenté en eau et que l'eau libre sera drainée. La première option peut durer plusieurs dizaines d'années (il rappelle qu'aucune estimation ne peut être effectuée concernant la durée du processus de gonflement), peut affecter à terme toute l'épaisseur du Keuper à gypse, et enfin affecter la majeure partie du village de Lochwiller. Les dommages pourraient être tellement sévères qu'il faille démolir une vaste partie du village.

### Recommandations

Puisque le gonflement se produit dans la zone intègre du fait de l'eau présente dans le nouvel aquifère, un bouchage complet de toutes les arrivées d'eau dans cet aquifère et un drainage de l'aquifère sont nécessaires. Chaque mesure entreprise vers une réduction de l'apport d'eau peut retarder le processus de gonflement. Comme cela a été discuté plus avant, il y a une relation entre l'eau souterraine issue du forage géothermique, la pluviométrie et la surrection due au gonflement de l'anhydrite. L'infiltration de l'eau de pluie dans la zone intègre peut être accélérée par les crevasses due au gonflement. Une augmentation de l'infiltration par les nouvelles crevasses va en retour favoriser le gonflement. Dans le but d'enrayer ce cercle vicieux, il faut extraire un maximum d'eau (eau souterraine et eau de pluie) de la zone intègre.

Une dernière considération est à prendre en compte, et elle n'est pas négligeable. Il s'agit de la dissolution du gypse. Ce minéral très soluble se dissout facilement et en particulier dans les eaux peu minéralisées. Les eaux pluviales sont peu minéralisées, et il n'est pas impossible qu'en s'infiltrant dans le sous-sol, elles aient déjà commencé à dissoudre le gypse néoformé. La zone altérée, dans laquelle les transformations minéralogiques se sont certainement étalées au cours du Quaternaire, ne contient quasiment plus d'anhydrite, ni de gypse, cela témoigne de leur dissolution. Il faut donc s'attendre à un tassement des sols de Lochwiller, probablement pendant (ce qui restera invisible si le gonflement le surpasse), mais surtout après la fin du gonflement.

## 9 RECOMMANDATIONS

Les recommandations émises par GEODERIS en 2014 [1] ont été validées globalement par l'expert. Cependant, il estime qu'il est quasiment certain qu'un arrêt complet du gonflement ne sera pas possible, de par son expérience dans plusieurs cas similaires de dommages dans des tunnels. Toutefois, il y a, selon lui, des mesures à envisager et à mettre en place au plus tôt pour ralentir la poursuite du gonflement. En les appliquant, en observant et en évaluant leur efficacité, la vitesse de surrection pourra certainement être ralentie. Il rappelle qu'il n'est toutefois pas possible de prévoir l'évolution du processus de gonflement et l'effet des mesures d'atténuation.

Il sera donc nécessaire d'acquérir davantage de données *in situ* pour dimensionner ces mesures d'atténuation, par exemple le bouchage du forage, la mise en place d'un drainage, ou la pose de moyens de surveillance.

**Les recommandations concernant les mesures à prendre sont les suivantes :**

a) Recommandations concernant le bouchage du forage géothermique

Il doit être évidemment réalisé en dessous de la base du Keuper à gypse, c'est-à-dire dans les couches de la Lettenkohle ou du Muschelkalk, et sous pression d'eau élevée, au moins 5 bars. Pour cette raison, l'utilisation d'un packer est recommandée. Le packer nécessiterait d'être placé et gonflé à la base de la Lettenkohle. Cela nécessite une connaissance de la localisation de l'ancien forage et une surforation, complète radialement, de ce forage.

b) Recommandations concernant la réparation des conduites souterraines

En complément de la réparation du réseau pluvial, toutes conduites défectueuses (égouts, adduction d'eau, ou autre) doivent être réparées immédiatement. De plus, toutes les crevasses ouvertes dans les terrains doivent être remplies et scellées par du matériau argileux, afin que l'eau de pluie puisse s'écouler facilement vers le réseau pluvial et non s'infiltrer dans les terrains.

c) Mise en place d'un drainage de l'eau libre de l'aquifère

Cette mesure permettra également de retarder le gonflement de l'anhydrite. Du fait de la topographie, un drainage gravitaire ne peut être envisagé. Un pompage sera nécessaire, mais ne pourra être mis en place qu'une fois le forage géothermique parfaitement rebouché, et que la configuration de l'aquifère actuel sera mieux connue.

d) Amélioration de la compréhension des mouvements de terrain

En vue de distinguer les divers mécanismes de mouvements de terrain (identification plus précise de la zone de gonflement actif dans la masse rocheuse, et distinction entre déplacements horizontaux dus au gonflement et dus à un possible glissement des terrains), et en vue de déterminer l'efficacité des mesures de bouchage dès qu'il aura été réalisé, des mesures de déplacements dans les trois directions (x/y/z) doivent être effectuées à une profondeur suffisante. Par conséquent, E. Pimentel recommande la pose d'au moins trois systèmes TRIVEC à l'intérieur de forages. Il s'agit d'une combinaison d'un micromètre et de deux inclinomètres, cela permet des mesures de déformations dans l'espace tous les mètres de la totalité du forage. Les forages devront recouper toute la hauteur du Keuper, en évitant toute infiltration d'eau, et atteindre la Lettenkohle. Il serait préférable de réaliser les forages avec un inhibiteur de gonflement (pour mémoire, les 4 forages réalisés en 2015 en ont bénéficié). E. Pimentel recommande les emplacements sur la figure ci-après :

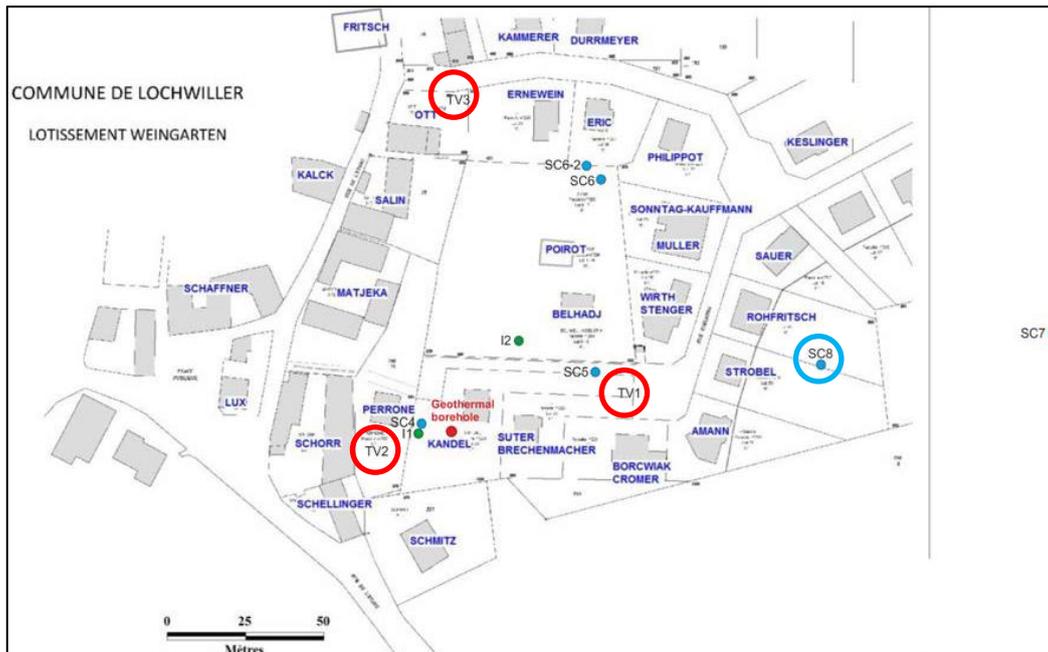


Figure 60 – Positions recommandées des 3 systèmes TRIVEC (TV1, TV2 et TV3) et du piézomètre SC8 proposées par E. Pimentel

e) Recommandations concernant l'hydrogéologie et l'hydrochimie du site

Connaissance de l'hydrogéologie du Keuper

Pour améliorer la connaissance de la dynamique de la nappe, GEODERIS recommande de placer des sondes piézométriques enregistreuses au pas de temps horaire dans les piézomètres SC4, SC5 et SC7. Les niveaux relatifs en SC4-SC5 fourniront une indication sur l'état des fuites dans le forage géothermique. L'analyse des chroniques au SC7 renseignera sur la qualité de la connexion entre nappe de vallée et nappe de coteau. Une comparaison avec la pression atmosphérique sera également utile pour juger de l'état de captivité de la nappe en ce lieu. Après une période de surveillance suffisante, il sera jugé de l'intérêt de forer un nouveau piézomètre par exemple entre SC5 et SC7.

E. Pimentel recommande, lui, de forer au moins un piézomètre supplémentaire (SC8, dont la position est proposée sur la Figure 60), l'amélioration de la connaissance de la nappe est primordiale pour dimensionner les moyens d'atténuation.

La connexion hydraulique entre les piézomètres SC7, SC8 et SC5 pourra être investiguée par traçage depuis le SC7 vers les autres forages. Cela permettra l'identification et la caractérisation des écoulements souterrains. Si le traceur arrive, il faudra déterminer si l'écoulement se produit au sein de couches préférentielles, en vue de dimensionner un rebouchage ou des mesures de drainage plus efficacement.

Surveillance de la qualité de l'eau

Cette surveillance proposée par GEODERIS est utile pour détecter une évolution du processus de dissolution-gonflement. La priorité sera donnée au SC4 dont le contenu en chlorure et en sodium est un indicateur des fuites du forage géothermique. Des prélèvements trimestriels sont proposés dans un premier temps.

## Surveillance des profils de température

Les mesures de température se sont révélées d'un intérêt primordial dans la compréhension des phénomènes. Nous proposons de les répéter à un rythme trimestriel en coïncidence avec les prélèvements pour analyses chimiques, dans le but de conforter les interprétations actuelles en examinant la variabilité saisonnière. Des modifications des profils pourraient traduire des changements dans l'activité des processus de dissolution-gonflement qui pourraient être responsables d'une évolution de la surrection.

### f) Reconnaissance du potentiel de gonflement du Keuper au droit du village

Des forages de reconnaissance peuvent être envisagés dans le reste du village, afin de cartographier correctement le niveau à anhydrite, c'est-à-dire localiser en profondeur et spatialement les zones altérées, gonflées et intègres, cela jusqu'au toit de la Lettenkohle. Cela permettra de savoir sous quels quartiers le potentiel de gonflement de l'anhydrite serait déjà épuisé. Du fait que le Keuper à gypse altéré est plus poreux que le Keuper intact, le Keuper altéré ne se comporte pas comme une couche imperméable et n'empêche pas la circulation des eaux.

### g) Contre-analyses des phases sulfatées

La présence de bassanite étant douteuse, E. Pimentel a recommandé de renouveler les analyses en question, sans que la température de séchage des échantillons ne dépasse 60°C. Cette recommandation a déjà été appliquée par GEODERIS, ce qui a conduit à valider l'absence de bassanite, et à renouveler l'interprétation des résultats dans le présent document.

### h) Recommandations concernant la surveillance des mouvements de terrain

Il est évidemment indispensable de poursuivre la surveillance du réseau de nivellement en surface. Nous recommandons d'examiner la possibilité de mettre en œuvre une analyse des déplacements de surface par interférométrie radar. Cette méthode permettrait, en débordant de la zone actuellement surveillée, de vérifier que l'on a bien cerné l'ensemble des zones impactées et également de contrôler qu'il n'existe pas, en dehors de la zone d'étude, des mouvements de terrain comparables, ayant des causes purement naturelles.

### i) Renouvellement des essais œdométriques dans des conditions plus adaptées ?

Le renouvellement des essais dans des conditions complètement contraintes, plus adaptées à la problématique de Lochwiller permettrait de connaître la pression de gonflement maximum des terrains, ainsi qu'une caractérisation approfondie du terrain et résoudrait certaines incertitudes d'un point de vue scientifique. Cependant, il est certain que la pression de gonflement maximum serait supérieure à la pression des terrains de couverture. Puisqu'une contre-pression, permettant de lutter contre le gonflement, ne peut être appliquée sur le lotissement (comme on l'applique dans les tunnels par des ancrages ou des revêtements rigides par exemple), la connaissance de la pression de gonflement maximum n'aurait pas une utilité pratique pour le dimensionnement de moyens d'atténuation.

### j) Recommandations relatives à la délivrance de permis de construire à Lochwiller

Tant que le processus de gonflement ne sera pas stoppé, et qu'un équilibre ne sera pas atteint, il est déconseillé toute nouvelle construction dans la zone de gonflement active, mais également en dehors, car même avec des moyens d'atténuation, il ne peut pas être exclu que d'autres maisons que celles touchées actuellement par les désordres, ne développent des fissures.

## 10 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Kimmel M. (2014) – « Avis sur l'origine des désordres survenus sur la commune de Lochwiller (67). Rapport GEODERIS E2014/003DE du 9 janvier 2014.
- [2] Barras AV. (2013) – « Sinistre de Lochwiller lié à une sonde géothermique. Situation en juillet 2013 et pistes d'investigations et de travaux ». BRGM/RP-62574-FR.
- [3] <https://fr.wikipedia.org>
- [4] Rashid H. (1995) – « Contribution à l'étude d'un bassin évaporitique triasique. Les marnes à anhydrite (Marnes irisées inférieures) de Lorraine ». Thèse de doctorat en Géosciences. UFR 181 S.T.M.P. ; GFD Sciences de la Terre. Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy I.
- [5] Carte et notice géologique de Saverne – 1/50 000 - BRGM N°233, date de parution 1979.
- [6] Géochronique (2001) – « Evaporites ». Numéro 80 de décembre 2001.
- [7] MEDAD (2007) – « Le gonflement-retrait des argiles. Comment prévenir les désordres dans l'habitat individuel ». Version 4 du 6 août 2007.
- [8] Cojan I. et Renard M. (2013) – « Sédimentologie » 3è édition - Editions DUNOD.
- [9] Kinsman D. J. J. – Calcium sulphate minerals of evaporate deposits : their primary mineralogy. Fourth international symposium on salt-northern Ohio Geologica Society, 343-348.
- [10] Butscher C., Huggenberger P., Zechner E., Einstein H. – « Relation between hydrogeological setting and swelling potential of clay-sulfate rocks in tunneling ». Engineering Geology 122 (2011) 204-214.
- [11] Anagnostou G., Pimentel E., Serafeimidis K. – Swelling of sulphatic claystones. Some fundamental questions and their practical relevance. Geomechanics and Tunneling 3 (2010), No. 5.
- [12] Fabre D. (2015) – « Géologie et propriétés géotechniques du gypse et de l'anhydrite. Dissolution & gonflement ». Mines et carrières hors-série. Octobre 2015.
- [13] Bekendam R. F., 2000 – Subsidence potential of the Hengelo Brine Field (Part I). Physico-Chemical Deterioration and Mechanical Failure of Salt Cavern Roof Layers. Fall 2000 Meeting, San Antonio, Texas, USA.
- [14] Robert A. et Fabre D. (1987) – « Rapport sur le gonflement ». Comité Français de Mécanique des roches. Groupe de travail « rupture en souterrain ».
- [15] Sass I. et Burbaum U. (2010) – « Damage to the historic town of Staufen (Germany) caused by geothermal drillings through anhydrite-bearing formations ». ACTA CARSOLOGICA 39/2, 233–245, POSTOJNA 2010.
- [16] Pimentel E. (2003a) – *Langzeitschwellversuche an Probenmaterial aus dem Freudensteintunnel. Zwischenbericht für den Zeitraum 0.1.01.2001-01.10.2003.*

- Bericht des Lehrstuhls der Universität Karlsruhe, erstattet an die DB Projekte Süd GmbH.
- [17] Pimentel E. (2003b) – « Swelling behavior of sedimentary rocks under consideration of micromechanical aspects and its consequences on structure design ». *Geotechnical Measurements and Modelling*. Proc. intern. symp. Karlsruhe, Germany, 23-26 Sept. 2003 : pp. 367-374. Lisse : Balkema.
- [18] Pimentel E. (2007) – A laboratory testing technique and a model for the swelling behavior of anhydritic rock. *The second half century of rock mechanics ; 11th Congress of the International Society for Rock Mechanics (ISRM)*, Lisbon ; Volume 1, 143-146 ; Taylor & Francis Group London.
- [19] Serafeimidis, K., Anagnostou, G., Vrakas, A. (2014) – *Scale effects in relation to swelling pressure in anhydritic claystones*. Int. Symp. on Geomechanics from micro to macro. University of Cambridge.
- [20] Bultel F. (2001) – « Prise en compte du gonflement des terrains dans le dimensionnement des revêtements des tunnels ». Thèse. Engineering Sciences. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées
- [21] Firtion F. (1952) – « Gypse et anhydrite triasiques des environs de Strasbourg ». *Comptes-rendus de la 19<sup>ème</sup> session du Congrès Géologique International*, Alger. Section XIII, fasc. XIII, p. 165-170.
- [22] Lucas J. (1962) – « La transformation des minéraux argileux dans la sédimentation. Etudes sur les argiles du Trias ». *Mém. Serv. Carte géol. Als.-Lorr.*, n° 23, 202 p., Strasbourg.
- [23] Chapellier D. (non daté) – « Diagraphies aquifères. Cours online de géophysique ». Université de Lausanne - Institut Français du Pétrole.
- [24] Rauh F., Spaun G. et Thuro K. (2006) – « Assessment of the swelling potential of anhydrite in tunnelling projects ». IAEG2006 Paper number 473.
- [25] Anagnostou G., Serafeimidis K., Vrakas A. (2015) – « On the Occurrence of Anhydrite in the Sulphatic Claystones of the Gypsum Keuper ». *Rock Mech Rock Eng* (2015) 48:1-13.
- [26] Strauss M. (2013) – « Assistance hydrogéologique dans le cadre d'un litige à Lochwiller (67) ». Rapport PLUME-ECI n°R13-498.
- [27] Hubert P., Olive P., Ravailleau S. (1996) – « *Estimation pratique de l'âge des eaux souterraines par le tritium* ». *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water science*, vol. 9, n°4, 1996, pp. 523-533.
- [28] Chrétien M. (2010) – « Compréhension des mécanismes de retrait-gonflement des sols argileux : approche sur site expérimental et analyse de sinistres sur constructions individuelles ». Soutenue le 28/05/2010 - *Université Bordeaux 1*.
- [29] Dakshanamurphy V., Raman V. (1973) – « A simple method of identifying an expansive soil ». *Soils and Foundations*, Japanese Soc. of Soil Mech. and Foundation Eng., vol. 13, n°1, pp. 97-104.
- [30] Jahangir E. (2011) – « Phénomènes d'interaction sol-structure vis-à-vis de l'aléa retrait-gonflement pour l'évaluation de la vulnérabilité des ouvrages ». Thèse

- soutenu le 15/11/2011. Spécialité : Génie Civil - Hydrosystèmes - Géotechnique INPL Nancy.
- [31] Chassagneux D., Stieljes L., Mouroux P., Menilliet F, Ducreux G.H. (1996) – « Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols (sécheresse-pluie) à l'échelle départementale. Approche méthodologique dans les Alpes de Haute-Provence ». Rapport BRGM n°R39218, 33 pp.
- [32] Steiner, W. (1989) – « *Wisenberg tunnel* » - Sonderdruck aus Tagungsbericht D037 der Fachgruppe für Untertagbau des SIA, 69-80.
- [33] Steiner, W. (1993) – « Swelling Rock in Tunnels: Rock Characterization, Effect of Horizontal Stresses and Construction Procedures ». International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 30, 4, 361-380.
- [34] Steiner, W. (2007) – « Einfluss der Horizontalspannungen auf das Quellverhalten von Gipskeuper ». Felsbau, 25,1, 15-22.
- [35] Babot Y., Schomburgk S. – « Expertise des venues d'eau chez Monsieur Schorr, 13 rue de l'étang à Lochwiller (67) ». Rapport BRGM/ALSNT08N13 de juin 2008.
- [36] Krüger G. – « Lochwiller. Terrain Schorr. Etude géotechnique G5 ». Rapport FONDASOL MS11-0448 du 12/12/2011.
- [37] BRUDER J. – « Lochwiller. Lotissement Weingarten et ses abords. Investigations géotechniques et instrumentation. Compte-rendu ». Rapport FONDASOL MS 130096 du 15/05/2013.

## **11 LISTE DES ANNEXES**

### **Annexe 1 – Album photographique**

### **Annexe 2 – Fiches de suivi de forage**

Annexe 2-A – Suivi de forage SC4

Annexe 2-B – Suivi de forage SC5

Annexe 2-C – Suivi de forage SC6

Annexe 2-D – Suivi de forage SC7

### **Annexe 3 – Coupes des équipements des forages**

### **Annexe 4 – Feuilles de synthèse gamma-ray, géologie et % d'évaporites**

Annexe 4-A – Feuille de synthèse SC4

Annexe 4-B – Feuille de synthèse SC5

Annexe 4-C – Feuille de synthèse SC6

Annexe 4-D – Feuille de synthèse SC7

### **Annexe 5 – Diagraphies gamma-ray avec corrélations**

### **Annexe 6 – Photographies des carottes**

Annexe 6-A – Photographies des carottes de SC4

Annexe 6-B – Photographies des carottes de SC5

Annexe 6-C – Photographies des carottes de SC6

Annexe 6-D – Photographies des carottes de SC7

### **Annexe 7 – Fiches de résultats d'analyses minéralogiques et géotechniques sur les échantillons rocheux**

Annexe 7-A – Fiches échantillons de SC4

Annexe 7-B – Fiches échantillons de SC5

Annexe 7-C – Fiches échantillons de SC6

Annexe 7-D – Fiches échantillons de SC7

### **Annexe 8 – Répartition des phases sulfatées dans les échantillons rocheux analysés, teneur en eau « naturelle » et degré de saturation de la roche**

### **Annexe 9 – Fiches de prélèvements d'eau**

### **Annexe 10 – Bordereaux analytiques Eurofins**

### **Annexe 11 – Bordereaux analytiques de datation des eaux OSUR Rennes**

### **Annexe 12 – Rapport de chantier de GINGER-CEBTP**

### **Annexe 13 – Analyses minéralogiques. Caractérisation géotechnique. GeoRessources**

### **Annexe 14 – Avis du Dr-Ing Erich Pimentel : « Expertise on the damages occurring in the community of Lochwiller (Alsace, France) ». Bericht 164201 - Zürich, 15.04.2016**

